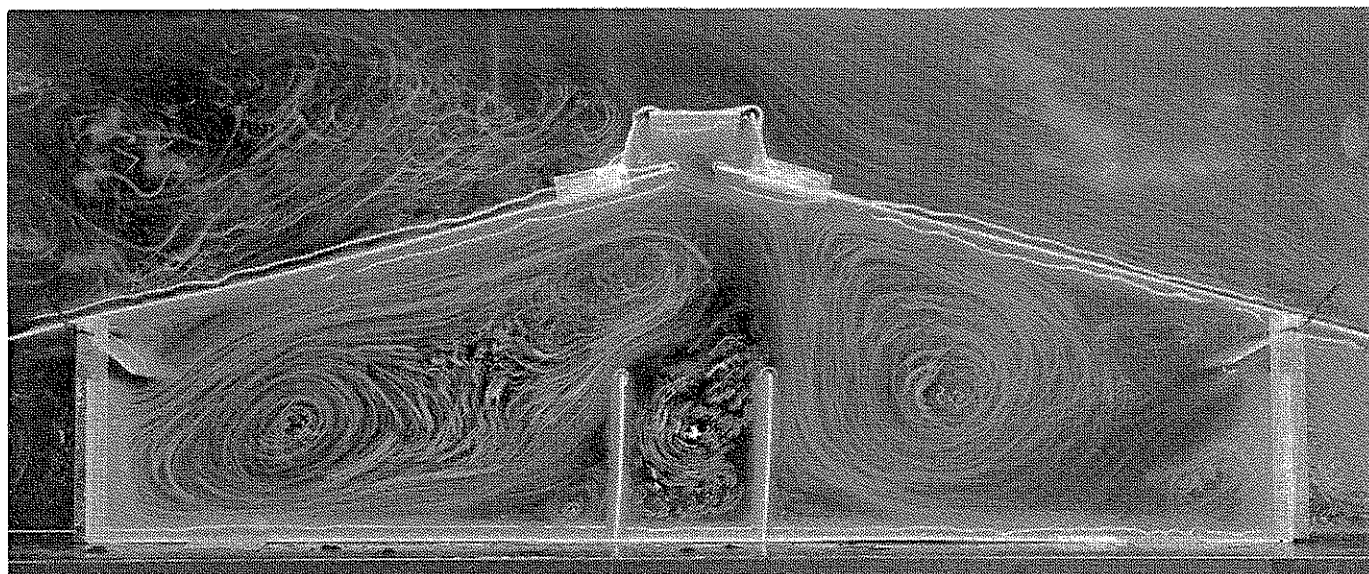


**SVERIGES
LANTBRUKSUNIVERSITET**

**VIND- OCH SNÖSIMULERING KRING BYGGNADER
GENOM MODELLSTUDIER I STRÖMMANDE VATTEN**

**SIMULATION STUDIES OF WIND AND SNOW AROUND
BUILDINGS BY MODEL STUDIES IN A WATER FLUME**

Per Andersson



**Institutionen för lantbruksteknik
Avdelningen för byggnadsvetenskap**

**Rapport 189
Report**

**Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Agricultural Engineering
Building Design Section**

**Uppsala 1994
ISSN 0283-0086
ISRN SLU-LT-R--189--SE**



Front page photo by courtesy of Centre of Rural Buildings (CRB), Aberdeen.

FÖRORD

Projektet med strömningsbordet har utförts vid Institutionen för Lantbruksteknik, Avdelningen för byggnadsvetenskap, LT-Bygg, Lantbruksuniversitetet, Ultuna. Projektet initierades av ett behov hos studenter, byggnadsrådgivare och djurägare att konkret se och uppleva hur luft och snö beter sig i och omkring byggnader och hur man med olika byggnadstekniska åtgärder kan undvika eller åtminstone minska negativa effekter. Sådana erfarenheter och kunskaper bör användas redan vid projektering, men även vid lösande av problem i befintliga anläggningar. En annan anledning till projektet var att rådgivningen till animalieproducenterna sedan början av 90-talet fokuserats på sk enkla byggnader. Dessa är oisolerade och ofta öppna längs ena långsidan.

Strömningsbordet projekterades och byggdes av agr.stud. Per Andersson inom ramen för ett 20 poängs examensarbete enligt fordringarna för agronomexamen. Per Andersson har också genomfört simulering av snö och vind kring modeller av enkla byggnader och under medverkan av docent Krister Sällvik författat denna rapport. Finansieringen av vattenbordet har gjorts inom ordinarie driftsanslag för undervisning vid dåvarande Institutionen för lantbrukets byggnadsteknik, Forsknings- och Undervisningsavdelningen på Ultuna, sedan den 1 jan 1994, LT-Bygg.

Den första jag vill tacka är min handledare, docent Krister Sällvik som också kom med idén till detta examensarbete. Agr. dr. Anders Ehrlemark och Agr. Olle Lundvall har hjälpt till med lösningar på problem och fungerat som bollplank under arbetets gång.

Tack riktas även till ingenjör Leif Claesson, KTH-Bygdmiljö (Gävle) som välvilligt ställde upp som opponent på mitt seminarium och även till docent Bo-Göran Hellers, KTH-Arkitektur. Båda framförde konstruktiv kritik och bidrog till den intressanta diskussion som följde vid seminariet. Tack till Rittners resefond som bidrog med medel för en resa till The Centre for Rural Buildings, Scottish Agricultural College i Aberdeen. Där träffade jag Mr Pat Ross som gav mig ovärderliga tips för konstruktion av och arbete med strömningsbordet.

Slutligen är det många personer som har bidragit till detta examensarbete men som inte har nämnts ovan, dessa personer är inte glömda utan kan känna del av min tacksamhet.

Ultuna, Uppsala i september 1994

Per Andersson

Krister Sällvik

INNEHÅLL

FÖRORD	2
SAMMANFATTNING	5
SUMMARY	9
INLEDNING	13
Bakgrund	13
Målsättning	14
STRÖMNINGSTEORI	14
Gränsskikt	14
Laminär och turbulent strömning	15
Skjuvningshastighet	15
Newtonska fluider	16
Friktionshastighet	16
Stråkande strömning	17
Reynolds tal	18
VIND	19
Luft rörelser runt objekt	21
Strömningsmönster inne i byggnader	23
SNÖ	23
Partiklars rörelse i en stationär fluid	23
Snötransport	24

FÖRSÖKSUTRUSTNING	29
Strömningsbord	29
TEST AV STRÖMNINGSBORD	34
Test av ostörd strömningsprofil	34
Test av vindprofilgeneratorer	35
Test av sanddeponering	37
Diskussion av testerna med strömningsbordet	39
EGNA FÖRSÖK	40
Bakgrund	40
Effekter av olika öppningars geometri på luft rörelser inomhus	41
Inbördes placering av två byggnader med olika utformning	45
Reducering av snöproblem vid byggnader med öppen front	49
LITTERATUR	55
APPENDIX	56

SAMMANFATTNING

Vind och snö kan ge negativa effekter omkring och i bebyggelse, lantgårdar, enskilda byggnader och även för byggnadsdetaljer. På en lantgård uppstår problem genom att vinden blåser upp portar, att snödrivor lägger sig framför viktiga portar och tillfartsvägar, att stora snömängder blåser in i öppna byggnader för djur, maskiner eller foder, att mycket höga vindhastigheter uppstår i djurens vistelsezoner, att den naturliga ventilationen sätts ur spel. Sedan början av 90-talet har intresset för enkla och oisolerade driftsbyggnader varit stort och många sådana byggnader har uppförts. Med ökad kunskap om hur vind och snö uppför sig omkring och i byggnader kan många av dessa problem undvikas redan på planeringsstadiet. Även åtgärder i befintliga miljöer kräver kunskaper om hur vind och snö uppför sig.

Värdet av modellstudier ligger i att man före byggnationen kan undersöka hur vind och snö kommer att verka på den planerade byggnaden eller på den gård byggnaden skall uppföras. I modellstudier kan man välja att undersöka alltifrån stora bebyggelseområden, gårdens alla byggnader, enskilda byggnader, till detaljer på byggnader.

Villkor för att modellstudier skall återge verkligheten på ett korrekt sätt

Beroende på vilket typ av objekt som skall studeras blir skalan hos modellen mellan 1:10 och 1:200. De lufthastigheter i verkligheten som skall efterliknas är mellan 0 och 25 m/s beroende på problemställningen. Förändringen av hastigheten med höjden över den plats där byggnaden står i verkligheten skall kunna efterliknas i det strömmande mediet kring modellen. Fallande snö kommer att följa med luftens rörelser och deponeras relativt jämnt över en plan yta. När luftens rörelser störs av byggnader så blir deponeringen en annan. Mera snö kommer att deponeras i de läzoner som uppstår runt byggnaderna. Detta blir ännu mer utpräglat när vinden är så kraftig att snön börjar driva. För att luften respektive snön i och kring modellen skall uppföra sig på samma sätt som i verkligheten fordras att

1. *Mediet kring modellen måste ha en lägsta grad av turbulens.*

Detta uttrycks normalt med Reynolds tal som bör överstiga 33200. Detta kan erhållas genom en lägsta hastighet hos mediet (vatten ca 0,15 m/s; luft 4,8 m/s) och att modellens reella fysiska dimensioner t.ex. en modell med höjden 100 mm och sidan 300 mm mot vindriktningen.

2. *Förändringen av hastigheten med höjden över den plats där byggnaden står i verkligheten skall kunna efterliknas i det strömmande mediet kring modellen*
3. *För fallande snö under blåsiga förhållanden krävs att villkor 1 och 2 är uppfyllda, samt att det snösimulerande materialets densitet är i proportion till den omgivande fluidens densitet. Det är också viktigt att en jämn storleksfördelning finns i det snösimulerande materialet.*

4. För drivande snö där samtliga tre rörelsemönster kan förekomma samtidigt

- *Saltation*: där kvoten mellan den hastighet som krävs för att lyfta **upp** en snöpartikel från snötäcket delat med hastigheten i omgivningen ska vara samma mellan modell och verklighet. Den uppåtriktade hastigheten i kubik delat med den dubbla kinematiska viskositeten och tyngdaccelerationen skall vara större än 30.
- *Suspension*: mycket komplicerade villkor där man måste etablera skalfaktorer med hjälp av dimensionslösa tal. Dessa baserar sig på massa, hastighet och diameter hos snökristallen, samt medelhastighet, densitet och dynamiska viskositet hos fluidens samt tyngdkraftens acceleration.
- *Krypande ytor*: inga speciella villkor

Modellstudier i strömningsbord och dess möjligheter att uppfylla villkoren

Modellstudier kan utföras på tre sätt: i strömningsbord, i vindtunnel eller genom datorsimuleringar. I strömningsbord används vatten istället för luft. Vattnet har jämfört med luft lägre kinematisk viskositet vilket medför att hastigheten kan vara ca 15 ggr lägre i modellstudien och ge samma förhållande mellan turbulenta och viskösa krafter och därmed uppfylla villkor 1 ovan. En låg hastighet är fördelaktig för att kunna följa försöken, vilket ger strömningsbordet en pedagogisk fördel framför vindtunnlar. Man kan välja att studera förhållanden genom att titta på sektioner av en byggnad eller studera förhållandena kring en eller flera hela byggnader. Om man väljer att titta på sektioner studeras endast tvådimensionella rörelser. Skall hela byggnader studeras blir rörelserna tredimensionella.

Strömningsbord för byggnadsaerodynamik har tidigare bara använts vid Centre for Rural Buildings i Aberdeen och University of Guelph, Guelph (Kanada). Erfarenheter från dessa har tagits tillvara och använts vid konstruktionen av strömningsbordet vid Institutionen för Lantbruksteknik, avdelningen för byggnadsvetenskap, Ultuna. Strömningsbordet är 4,5 m långt och har en bredd på 1 m där modellerna placeras. Vattendjupet kan regleras steglöst från 5 cm upp till 30 cm.

För att kunna dokumentera resultaten vid modellstudier är lämpliga vattenhastigheter, mellan 0,1 till 0,25 m/s, vilka också uppfyller simuleringsvillkor 1. Villkor 2, innebär att vattnet skall ha en hastighetsprofil när det träffar modellen som motsvarar den som finns i verkligheten dvs att hastigheten tilltar med höjden över marken. Detta åstadkommes genom att placera vertikala hinder i form horisontella eller vertikala rör som stör vattenflödet, sk vindprofilgeneratorer, före mätområdet.

För att simulera snö användes en fin kiselsand med en partikeldiameter mellan 0,1 till 0,3 mm och en sann rymdvikt av 2750 kg/m^3 . Det är viktigt med varierande partikeldiametrar. Från en i botten perforerad sandlåda placerad ovanför bordet släpptes sanden ner i det strömmande vattnet via tre skärmar för att erhålla en jämn spridning.

Dokumentation av vind och snösimulering och test av strömningsbordet

Vattenhastigheter har mätts med en flygel, dvs en magnetförsedd propeller som ger ifrån sig pulser när den roterar. Rörelsemönster i vattnet gjordes synligt med tusch eller baby-puder. Under försök där snödeponering har simulerats har sanddjupet mätts med en linjal. Försöken har dokumenterats med en videokamera placerad i en ställning ovanför strömningsbordet.

Innan försöken med modeller genomfördes i strömningsbordet testades följande prestanda:

1. Den absoluta hastigheten hos vattnet och dess variation i alla tre riktningar vid ett ostört flöde.
2. Hur vattenhastigheterna förändras när vindprofilgeneratorerna placeras i strömningsbordet.
3. Hur sanden deponeras i strömningsbordet utan att några modeller fanns i detta.

Resultaten av dessa tester var i tur och ordning:

1. Att vattenhastigheterna var jämna över hela strömningsbordet och var 0,24 m/s vid ett vattendjup av 6 cm och 0,09 m/s vid ett vattendjup av 15 cm.
2. Att hastighetsprofilen i mätsträckan fick ett önskvärt utseende när vindprofilgeneratorerna placerades i vattenflödet före mätsträckan.
3. Att sanddeponeringen var jämn (önskvärt) inom vissa områden men kunde mellan dessa områden variera, beroende på en ojämn storleksfördelning i sanden.

Testerna utföll till belåtenhet och strömningsbordet godkändes för modellförsök.

Egna simuleringar i strömningsbord

Försök genomfördes med modeller av de kategorier av byggnadsmiljöer som är mest aktuella för lantbruksbyggnader, nämligen gårdssituationer och den enskilda byggnaden. Att andra situationer inte har provats inom detta arbete ska därför inte tolkas som att det inte är möjligt att utföra modellförsök även för annan typ av bebyggelse eller byggnadsdetaljer.

1. *Att finna den lämpligaste placeringen av en nytt låghusstall med öppennock i förhållande till ett äldre höghus för att undvika att snö tränger in genomnocken.*

Denna frågeställning är ofta aktuell för den lantbrukare som planerar att utöka sin produktion. Byggnaderna antogs av funktionsskäl vara sammanbyggda. Flera olika placeringar av byggnaderna i förhållande till vindriktningen provades. Hur byggnaderna

ska vara placerade kommer att avgöras av den huvudsakliga vindriktningen vid snöfall. Simuleringarna visade bl. a. att den tumregel som säger att de första tre metrarna avnocken från gavlarna ska vara övertäckta inte verkar vara tillräckligt om byggnaden med öppen nock står i lä av en högre byggnad. Nocken bör då vara tät ända upp till 20 meter räknat från gaveln mot vinden.

2. Försök för att prova hur luftströmlarna inne i byggnaden i förändras om utformningen på en öppning i väggen mot vinden ändras.

Försöksbyggnaden hade en öppen framsida och i den bakre väggen fanns det en horisontell öppning nära taket som var helt öppen eller att den bakre väggen bestod av vertikala glesa brädor. Den fria öppningsarean för luften var densamma. Med glespanelen blev luftfartigheterna lägre i byggnaden samtidigt som genomluftningen blev sämre jämfört med den högt belägna öppningen. Placering i höjddled av öppningen verkar vara av betydelse för hur luftströmlarna blir inne i byggnaden.

3. Reducering av snöproblem i byggnader med öppen front.

I byggnader med pulpettak och öppen framsida drabbas man av att snö kommer in byggnaden framifrån när vinden ligger på bakifrån. Ett tänkbart sätt att undvika detta är att ha en öppning i bakväggen. Simuleringen av en sådan åtgärd visar att öppningen har en klart minskande effekt på mängden snö som driver in i byggnaden framifrån.

Snödeponering i och kring samma typ av byggnad men utan öppning har dels registrerats i verkligheten och dels simulerats i strömningsbord i Kanada. Egen och kanadensisk simulering gav likvärdiga resultat. Jämförelsen mellan simulering och verklighet visar att kvantitativa resultat av snöförsök inte är 100% korrekta, men att en kvalitativ likhet finnes.

Strömningsbordets möjligheter

Strömningsbordet är ett utmärkt verktyg för att kartlägga luftströmlarnas i och kring byggnader och kan med fördel användas för att studera olika detaljers inverkan på luftströmlarna. Det är inte möjligt att mäta fartighet i en modell för att sedan räkna om den till en fartighet i verkligheten. När det gäller snö kan strömningsbordet användas för att jämföra snödeponering vid olika utformning av byggnader/modeller. Likheterna mellan snödeponering i naturen och i modellen är dock inte kvantitativa utan kvalitativa. För att simulera snötransport i form av suspension och saltation, krävs en vattenfartighet av minst 0,77 m/s i strömningsbordet. Det svenska bordet har endast 0,09 m/s. Den höga fartighet som skulle krävas för att simulera snötransport skulle få en negativ effekt genom att vattnet stråkar, dvs att en störning av strömmingen inte kan fortplanta sig mot strömningsriktningen. Detta inträffar i luft vid ljudfartighet och skulle därför kunna leda till felaktiga resultat och slutsatser vid simuleringar i strömningsbord.

SUMMARY

Wind and snow could have negative effects on buildings in densely populated areas, farm yards, single buildings or even on details of the building. Farm related problems are for example that the wind blows up doors, that the natural ventilation fails with too high air-speeds in the animal residence area, huge amounts of snow deposits inside open buildings, formation of snow-drifts in front of doors or on roads. In Sweden the interest for open, natural ventilated buildings has increased since the beginning of the 1990's. Many such buildings have also been built. With increased knowledge of the manners of snow and wind many problems could be avoided before the buildings are built. Knowledge is also necessary for actions in existing buildings and farmsteads.

The advantage of using models for predetermining air and snow patterns has been recognised since many years. In model studies you could choose to investigate the wind and snow situation at different scales from densely populated areas, farm yards, single buildings to specific details of the building.

Demands on model studies to recreate reality

Depending on the object to be studied, the scale of the model has to be altered. Normally the scale is between 1:10 to 1:200. The air-speeds to be recreated in the model study are in nature ranging from 0 m/s to 25 m/s. The change of speed with the height over ground must be recreated in the model. Falling snow will follow the wind and deposit equally over a flat surface. If the wind is disturbed by buildings the result will be an uneven formation of snow. More snow will deposit in the areas where the airspeeds are low. If the ambient wind is so strong that the snow starts to drift the same pattern will be repeated but with greater differences.

To achieve the same behaviour of the air and the snow in the model and as in reality the following criterias must be fulfilled in the model study:

1. *The fluid in the simulation must have a certain degree of turbulence.*

This means that Reynolds number should be 33200 or greater. This can be acquired by a speed of at least (water 0,15 m/s or air 4,8 m/s) in the fluid if the models physical dimensions are: Height 0,1 m and a side of 0,3 m in the flow direction.

2. *The change of speed with height over the location where the building stands in reality should be recreated in the fluid flow around the model.*
3. *For falling snow during windy conditions criterias 1 and 2 are to be fulfilled. The density of the snow simulating material must be in proportion to the ambient fluids density but it is also important that a wide range in the particle size is present.*

4. *For snow drifts up to three possible phenomena can occur.*

Saltation: Where the quotient between the velocity required to lift **up** a snow particle from the snow cover divided with the ambient velocity should be the same between model and reality. This lifting velocity in cubic divided by two times the kinematic viscosity multiplied with the gravity constant should be at least 30.

Suspension: Complicated criterias where you have to establish scale factors with help of dimensionless numbers. The significant variables for establishing such scale factors are the snow particles mass, size and terminal velocity and the ambient fluids density and velocity and dynamic viscosity and the gravity constant.

Surface creep: No special criteria.

Model studies in a water flume

Model studies can be made in three different environments: in a water flume, in a wind tunnel or by computer simulations. One advantage with using water compared to air is that water has a lower kinematic viscosity allowing velocity to be approximately 15 times less in the study with the same relation between turbulent and viscous forces to fulfil criteria 1. A low speed is preferable because it makes it easier to study the movement patterns. This gives water flume a pedagogic advantage compared to wind tunnel. You could choose between study sections of a building or whole buildings so that in the first case you study movements in two dimensions and in the latter case in three-dimensional movements.

Earlier only two water flumes for building aerodynamics has been used. One at the Centre for Rural Buildings, Scottish Agricultural College, Aberdeen and the second, which mostly has been used for snow simulations, at the School of Engineering, University of Guelph, Canada. Experiences from these two have been used in the construction of the water flume at the Department of Agricultural Engineering, Building Design Section, Ultuna. The water flume is 4,5 m long and has an width of 1 m where the models are placed. The water level in the flume could be varied from 5 to 30 cm.

For graphic documentation of the studies a velocity between 0,1 to 0,25 m/s is perfect which also fulfils criteria 1.

To fulfil criteria 2 i.e. that the wind profile between model and reality should be in scale, wind velocity profile generators were placed in the flume. They disturbed the flow so that the velocity profile became the desired one. A silica sand with a particle diameter between 0,1 to 0,3 mm and a true density of 2750 kg/m³ were used to simulate snow. This sand were placed in a hopper above the flume.

Documentation

The studies has been documented with a VCR-camera placed above the flume. Velocities have been measured with a pulse generating propeller. Sand deposition has been measured with a ruler. Ink or baby powder were used to visualise the movement patterns in and around the model.

Test of the equipment

Before trials with models it was necessary to test the equipment as follows:

1. The velocities in the flume and their variation in all three directions for an undisturbed flow.
2. How the velocities changed when the wind profile generators were placed in the flume.
3. How the sand accumulated in the flume without any models in the flow.

Accordingly results of the test:

1. The velocities were even in the flume and the velocity was 0,24 m/s with a water depth of 6 cm and 0,09 m/s with a depth of 15 cm.
2. The velocity profile was the desired when the generators were placed in the water flume.
3. The accumulation of snow was equally distributed over certain areas but could vary between these areas. Although the differences were not too big. This difference was the result of an uneven size-distribution in the silica sand.

After these tests it was decided that the water flume could be used for model studies.

Model studies

Tests were made on the categories of building environment that are of most interest for farm buildings namely farm yards and single buildings.

The first study aimed at finding the best location of a single-floor building with an open ridge next to a higher building with regard to avoid snow blowing into the ridge. The results show that the best location is depending on the main direction of the wind. The first part of the ridge from the short sides should be covered. The length of the covered ridge should be adjusted to the local situation.

Experiments were made on a section of single-sloped open-front building to compare the influence of different rear opening design on the air patterns inside. Two different opening designs with identical vent areas were tested. The air patterns changed both in its magnitude and directions between the models. The placement of the centre for the slot influence air patterns.

Experiments were made on a single-sloped open-front building to investigate if the problem with snow accumulation at the front of the building, when wind is blowing from behind the building, could be solved with a slot-opening at the top of the rear wall. This action had a positive effect on the amount of snow that drifts back into the building. The same building without a rear slot has been tested in a field study in Canada. The results were compared showing the quantitative results of the model study were not 100 % correct but there was a qualitative correlation between the model and the field study.

The final conclusions are that the water flume is an excellent tool to investigate and show the air patterns in and around buildings. Regarding snow, the water flume could be used to compare results between models. There is some correspondence between snow accumulation in the water flume and in nature. Unfortunately it was not possible to simulate two phases of snow drift i.e. Saltation and Suspension because of a too low velocity of the water (0,09 m/s) in the flume. The required velocity for simulating those two phases of snow drifting is 0,77 m/s.

INLEDNING

Behovet av att ha information för att på goda grunder kunna fatta ett beslut är och har alltid varit stort. Detta gäller speciellt vid planering och produktion av byggnader där man binder ett stort kapital under en lång tid framöver. Ett område där kunskapen är bristfällig hos lantbrukets byggnadsplanerare är hur vinden påverkar luftens rörelser i och omkring byggnader. Behovet av sådan kunskap har ökat i takt med att användningen av enkla, öppna, byggnader som ventileras med naturlig ventilation har ökat inom lantbruket. Främst är det byggnader för djur, maskiner och foder. Inom bostads- och kontorsbyggnader används generellt mekanisk ventilation för frånluftsevakuering.

Vinden och dess riktning har den överlägset största betydelsen för hur ventilationen ska fungera i sådana byggnader. Vinden har också betydelse för hur snö, sand och damm deponeras kring och i byggnader, samt hur lukter och rök sprids. I Sverige är snö den faktor som ställer till mest problem genom att drivor bildas på fel platser t.ex. utanför portar, inuti halvöppna hallar, framför dieseltankar eller på uppfartsvägar. Sådan drivbildning förorsakar mycket arbete och kan i vissa fall vara stora säkerhetsrisker vid utrymning och tillfart. Snödrivor på tak kan genom att de orsakar osymmetrisk belastning ge antingen konstruktionsmässiga problem eller om dessa inte är lösta kollaps av tak.

Hur luften rör sig kring byggnaderna på en gård och var snödrivor lägger sig varierar för varje gård. Faktorer som inverkar är byggnadernas utformning, placering i terrängen, placering i förhållande till varandra, vegetation och topografi. Dessutom varierar vindens riktning över tiden. Visserligen finns oftast kännedom om förhärskande vindriktning när det kommer snö men det mycket stora värdet av modellstudier framstår med all önskvärd tydlighet. I en modellstudie i strömmande vatten kan man variera alla ovanstående parametrar och testa hur olika åtgärder kan minska risker för negativa effekter av vind och snö i och utanför byggnader. Genom modellstudier kan man också prova hur ny utformning av byggnader eller byggnadsdetaljer såsom snöstaket och vegetation påverkar luftströmmar och drivbildning samt pröva vilken placering av en ny byggnad som är mest lämplig för att undvika problem med vind och snö.

Bakgrund

Modellstudier av hur luft rör sig i och kring byggnader kan utföras på tre olika sätt eller som en kombination av dessa.

- * Genom att bygga en modell av en byggnad, grupp byggnader eller byggnadsdetalj och studera luftströmmarna i en **vindtunnel**

- * Genom att bygga en modell av byggnaden, grupp av byggnader eller byggnadsdetalj och studera luftströrelserna i ett **strömningsbord** där man använder strömmande vatten.
- * Genom att med hjälp av dator göra en **simuleringsmodell**

Studier i ett strömningsbord har flera fördelar; modellerna av byggnader eller byggnadsdetalj går snabbt att tillverka. Man kan snabbt växla mellan olika objekt. I ett strömningsbord kan man studera snöfall och snödrev. Motsvarande studier i en vindtunnel blir behäftade med fel. En annan skillnad till strömningsbordets fördel beror på skillnaden i fysikaliska egenskaper hos luft och vatten. I ett strömningsbord kan man med blotta ögat observera hur luften rör sig. I en vindtunnel måste man ofta använda sig av höghastighetskameror för att kunna följa förloppet, eftersom hastigheterna är och måste vara högre, på grund av skillnader i densitet och viskositet mellan luft och vatten, än i ett strömningsbord. Datorbaserade modeller har fördelen att man slipper alla skalfaktorer samt att risken för mätfel elimineras. En annan fördel är att man har möjligheten att föra över ritningar från ett CAD-program till ett simuleringsprogram. Ett problem med datormodeller är att det krävs stor och därmed dyr datakraft för att i dator simulera de komplexa luftströrelserna. Det största problemet med datorsimulering är att lösa de strömningstekniska ekvationerna. För att lösa dessa ekvationer måste man begränsa randvillkoren, vilket medför att resultaten kan innehålla fel jämfört med en verklig situation. Därför brukar man ofta komplettera datorsimuleringar med fältstudier eller andra typer av modellstudier.

Målsättning

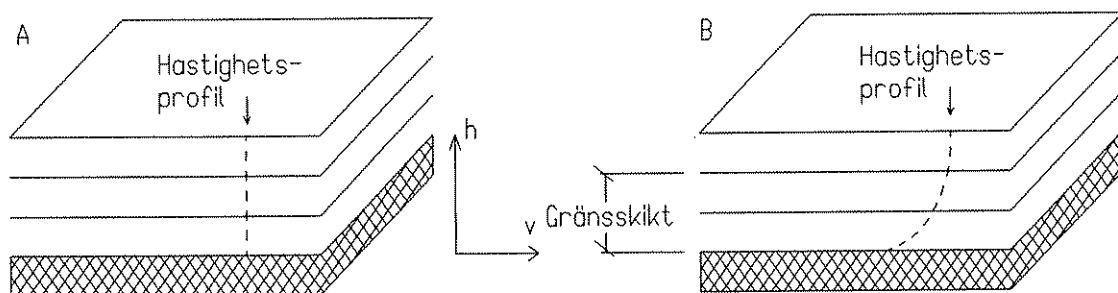
Syftet med denna rapport är att visa den stora användbarheten av strömningsbord både som ett **pedagogiskt verktyg** för att öka förståelsen av luft- och snöströrelser kring och i byggnader och som ett **projekteringshjälpmedel**, genom att göra modellstudier i samband med planering av anläggningar där man är beroende av att undvika negativa effekter av vind och snö, exempelvis öppna lösdrifter.

STRÖMNINGSTEORI

Gränsskikt

Ideal strömning är ett tänkt tillstånd som motsvarar den strömning som ett fluidum med viskositeten lika med noll och en konstant densitet skulle uppvisa. Viskositeten är ett mått på inre friktion i fluiden. Ideal strömning skulle således motsvara en helt friktionsfri strömning. I verkligheten har alla fluider en viskositet som är skild från noll och en

verklig strömning avviker därför mer eller mindre från den ideala, se figur 1. Det område där en fast yta väsentligt påverkar strömningen benämnes gränsskikt.



Figur 1. A, visar en ideal strömning där ingen vidhäftning sker vid väggen. Hastigheten v är konstant över tvärsnittet. Figur B, visar en verklig strömning där vidhäftning sker så att fluidens hastighet vid väggen är noll. På grund av mediets viskositet bromsas även de utanliggande mediaskikten så att en hastighetsprofil utbildas.

Laminär och turbulent strömning

En **laminär** strömning är en skiktad strömning där impulsutbytet mellan skikten sker endast genom molekyl diffusion, samt att kraftverkan mellan skikten endast består av viskösa skjuvkrafter.

En **turbulent** strömning är en oregelbunden strömning med virvlar, där impulsutbytet sker genom molekyl diffusion och virveldiffusion, samt att kraftverkan mellan "skikten" består av viskösa- och turbulenta skjuvkrafter.

Skjuvningshastighet

Om vi tänker oss en tunt skikt av en fluid mellan två parallella plattor, med avståndet dy ifrån varandra som i figur 2. Där applicerar vi en kraft F på den övre plattan så att strömningen i skiktet blir laminärt. Den övre plattan flyttar sig då med en jämn hastighet dv relativt den undre plattan. Skjuvkraften över plattans area är proportionell till hastighetsgradienten dvs

$$\frac{F}{A} = \tau \propto \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

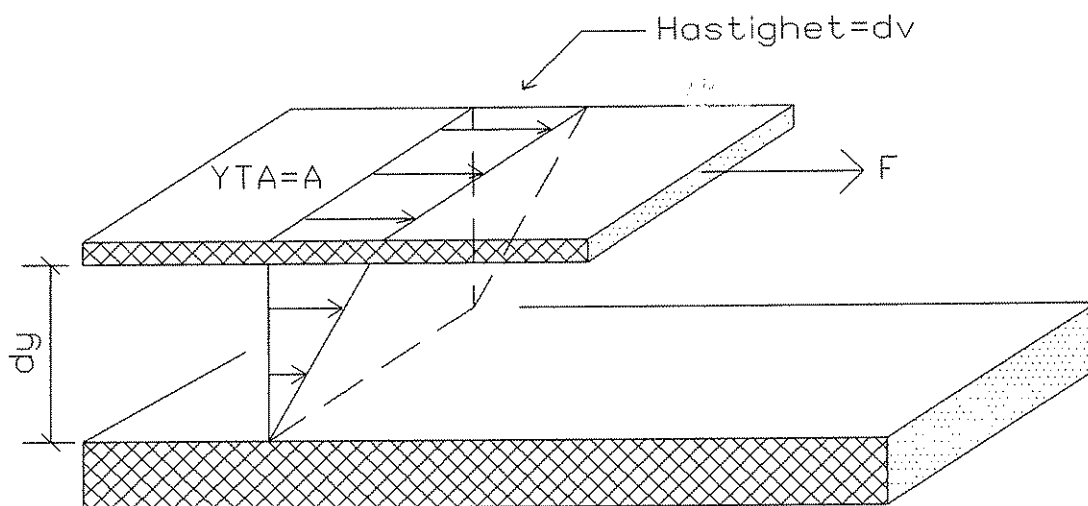
Proportionalitetstecknet i ekvation 1 kan ersättas genom att insätta en proportionalitetsfaktor, vilken är densamma som den dynamiska viskositeten. Detta ger ekvation 2.

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

där τ är skjuvspänningen [N/m^2]

μ är fluidens dynamiska viskositet [Ns/m^2]

Termen $\frac{dv}{dy}$ benämnes skjuvningshastighet.



Figur 2. En platta dras över en parallell platta med kraften F så att en laminär strömningsprofil uppstår.

Newtonska fluider

Om sambandet mellan skjuvspänningen och skjuvningshastigheten är linjärt säges fluiden vara Newtonskt och i annat fall icke-Newtonskt. Exempel på Newtonska fluider är luft och vatten. Exempel på icke-Newtonska fluider är mjölk, tandkräm och färger. Generellt kan man säga att små molekyler ger fluiden Newtonska egenskaper och stora molekyler ger icke-Newtonska egenskaper.

Friktionshastighet

I ett turbulent flöde över en yta finns det en hastighetsgradient och därför också en rörelsemängdsgradient. En rörelse vinkelrätt mot ytan ger upphov till att rörelsemängd överförs. Delar av fluiden med hög hastighet kommer då att röra sig mot regioner med lägre hastighet. Den sträcka, y_e , som fluiden kommer att röra sig vinkelrätt mot strömningsriktningen är ett mått på hur lång sträcka rörelsemängden som överförs kommer att behålla sin ursprungliga identitet. Friktionshastigheten, U^* , är en teoretisk hastighet som ej går att mäta direkt utan används endast i beräkningar och är ett mått på hur snabbt överföringen av rörelseenergi sker och kan därför användas som ett mått på graden av turbulens. Friktionshastigheten är också ett mått på vindens kapacitet att bära partiklar (Lyles, Allison, 1979). Friktionshastigheten anges som roten ur skjuvspänningen delat

med densiteten (ekvation 3a) eller som sträckan y_e multiplicerat med hastighetsförändringen, dv över sträckan dy (ekvation 3b).

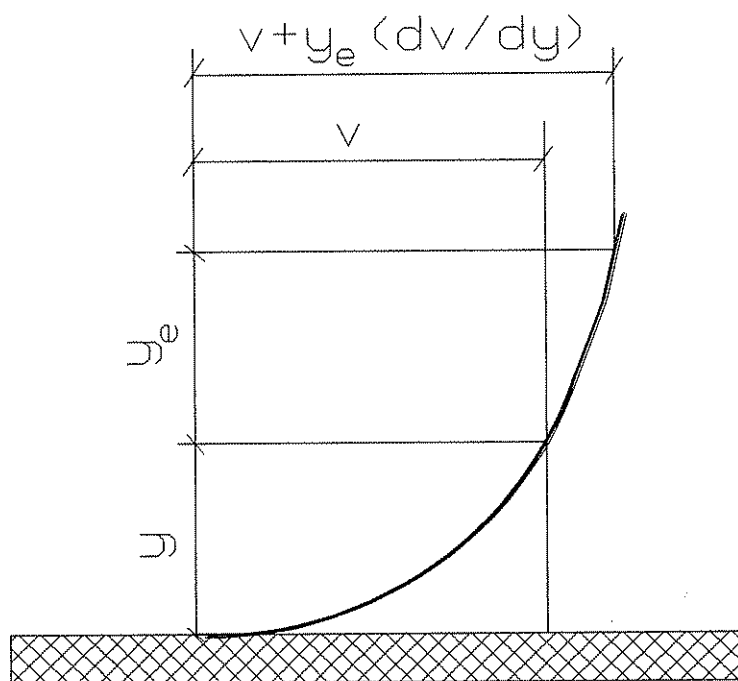
$$U^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (3a)$$

$$U^* = y_e \frac{dv}{dy} \quad (3b)$$

Sambandet mellan y_e och y ges av ekvation 4 där y är avståndet från en yta.

$$y_e = Ky \quad (4)$$

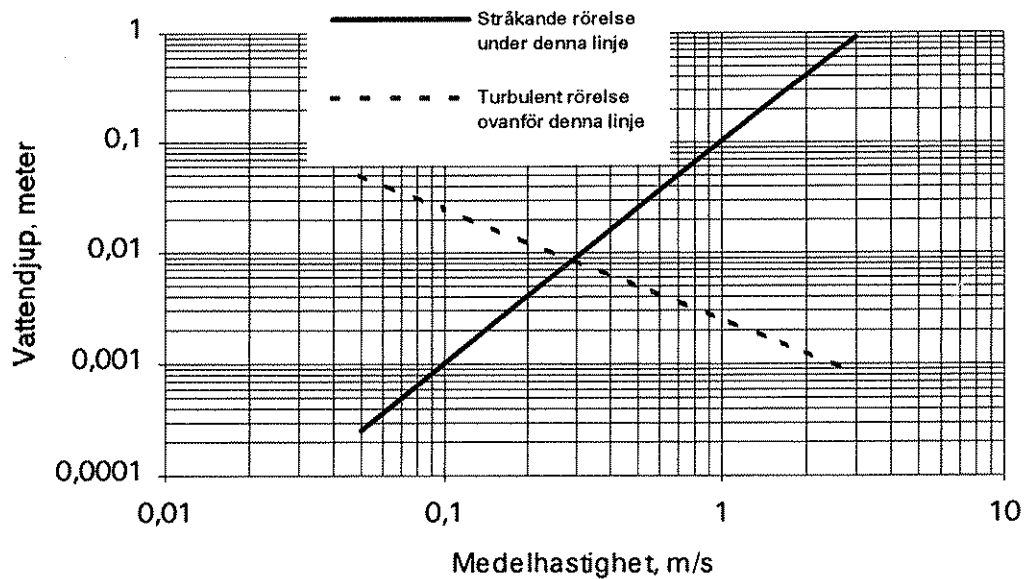
där K är von Karmans konstant och är lika med 0,4 [dimensionslöst]



Figur 3. Hastighetsprofil i en fluid ovan en fast yta. Beteckningar för att beräkna friktionshastigheten i ekvation 3b.

Stråkande strömning

I öppna ledningar kan såväl laminär som turbulent rörelse vara strömmande eller stråkande. En vätskerörelse är stråkande, då dess hastighet är större än våghastigheten. En stråkande rörelse innebär att en störning av rörelsen inte kan fortplanta sig mot rörelseriktningen. För luft sker omslaget mellan strömmande ock stråkande rörelse vid ljudhastigheten. För vatten sker detta omslag vid lägre hastigheter och beror på vattendjupet, se figur 4.



Figur 4. Inverkan av vattnets hastighet och djup för rörelsetillståndet i en bred öppen ledning med konstant vattendjup. Den streckade linjen skiljer på laminära och turbulenta rörelser, den heldragna linjen på strömmande och stråkande rörelser.

Reynolds tal

Reynolds tal, Re , är ett dimensionslöst tal och beräknas genom ekvation 5. Reynolds tal anger hur hastighetsprofilen ser ut i en strömmande fluid. Högre tal ger en mer turbulent strömning.

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu} \quad (5)$$

där v är fluidens hastighet [m/s]

d är en längdenhet (inte nödvändigtvis en diameter) [m]

ρ är fluidens densitet [kg/m³]

Reynolds tal vid simuleringar av vind kring objekt i landskapet

För en byggnad, staket eller andra konstruktioner beräknas Reynolds tal genom att d i ekvation 5 sätts lika med objektets höjd. Vid studier av skalmodeller och i **andra fluider** gäller att uppfylla villkoret att Reynolds tal för modellen (Re_m) skall vara lika som för det verkliga objektet, (Re_a) se ekvation 6.

$$Re_m = Re_a \quad (6)$$

Om modellstudien görs med luft med **samma** temperatur, tryck och luftfuktighet, så innebär det att ekvation 6 får ett utseende som i ekvation 7 om vi löser ut hastigheten i modellen.

$$v_m = \frac{v d_a}{d_m} \quad (7)$$

I ekvation 7 framgår att hastigheten i simuleringen blir större ju mindre modell man använder. Exempel: Om vi nu t.ex. skulle vilja studera luftströrelserna i en modell som vi har byggt i skala 1:50 vid en vindhastighet av 6 m/s så blir den erforderliga hastigheten i modellen 300 m/s. Exemplet visar att använda samma Reynolds tal för både modell och verklighet som ett villkor för simulering av luftströrelser runt byggnader är olämpligt. Anläggningarna blir dyra och komplicerade, samt att man får svårigheter att följa förloppet med ögat.

Om däremot studien görs i strömmande vatten reduceras den erforderliga vattenhastigheten för konstant Reynolds tal med förhållandet mellan densitet hos luft, $1,2 \text{ kg/m}^3$ och vatten, 1000 kg/m^3 och förhållandet i dynamisk viskositet luft och vatten $18,1 \cdot 10^{-6} \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$ och vatten $1,00 \cdot 10^{-3} \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$ enligt villkoren i ekvationerna 5 och 6 (om omgivningstemperaturen är 20°C i båda fallen). Vattenhastigheten behöver då vara 19,9 m/s för att Reynolds tal ska vara lika i både modell och verklighet. Med detta exempel visas det mycket fördelaktiga i att studera luftströrelser runt byggnader med hjälp av modeller i strömmande vatten istället för i luft.

VIND

Luftströmmar eller vind alstras av skillnader i lufttryck på olika ställen i atmosfären. Skillnaderna i lufttryck beror på att jorden absorberar olika mängd solenergi på olika platser. Den luftström som alstras kommer i enlighet med teorin om gränsskikt att få en hastighetsprofil där hastigheten tilltar med höjden över jordytan.

Den naturliga vinden är turbulent, hur turbulent beror främst på underlaget dvs terrängens beskaffenhet. Den naturliga vinden är turbulent i alla lager ända ner till marken (Jensen, 1958).

Vindhastigheten i ett turbulent flöde över en ojämn yta beskrivs med hjälp av ekvation 8 (Lyles och Allison, 1979. Jensen, 1958).

$$v(z) = \frac{U^*}{K} \ln \frac{z - z_0}{z_0} + CU^* \quad (8)$$

där $v(z)$ är hastigheten på höjden z över marknivån [m/s]

U^* är friktionshastigheten [m/s]

$K=0,4$ är von Karmans konstant [dimensionslös]

z_0 är en skrovlighetsparameter beroende av terrängens typ. [m]

C är en konstant som oftast är 0.

För att på ett korrekt sätt simulera hur luft rör sig kring ett föremål måste man försäkra sig om att vindprofilen är densamma i både modell och i det verkliga fallet. Jensen (1958) skriver att skrovlighetsparametern i modellen måste vara i skala till skrovlighetsparametern i naturen;

$$\frac{Z_{0a}}{z_{0m}} = \frac{D_a}{d_m} \quad (9)$$

där a står verkligheten och m för modellen.

Skrovlighetsparametern, z_0 , kan beräknas med ett flertal formler som alla är varianter av ekvation 10, (Lyles och Allison, 1978).

$$z_0 = \lambda h^n \quad (10)$$

Där h är genomsnittliga ojämnhetshöjden [m]

λ och n är konstanter med olika värden för olika situationer [dimensionslösa]

Jensen (1958) mätte upp olika skrovlighetsparametrar för olika terrängtyper i Danmark och Krieg (1992) har tagit fram värden på z_0 för olika terrängtyper i Sverige, se tabell 1.

Tabell 1. Skrovlighetsparameter, z_0 , för olika platser eller terrängtyper.

Plats eller Klass	Beskrivning	z_0 [m]	Källa
Hojer	Öppet vatten, inga vågor	$1,8 \cdot 10^{-4}$	Jensen, 1958
Frerslev	Odlingslandskap	$3,0 \cdot 10^{-3}$	Jensen, 1958
Albertslund	Odlingslandskap	$9,5 \cdot 10^{-3}$	Jensen, 1958
Naesgård	Odlingslandskap	$4,5 \cdot 10^{-2}$	Jensen, 1958
Köpenhamn	Centrala Köpenhamn	7,5	Jensen, 1958
Klass 0	Öppet vatten	$2 \cdot 10^{-4}$	Krieg, 1992
Klass 1	Plan öppen slätt med få byggnader och träd	$3 \cdot 10^{-2}$	Krieg, 1992
Klass 2	Jordbrukslandskap med skogsdungar, trädridåer och spridd bebyggelse	0,1	Krieg, 1992
Klass 3	Städer, skogslandskap med mindre uppodlade områden	0,4	Krieg, 1992

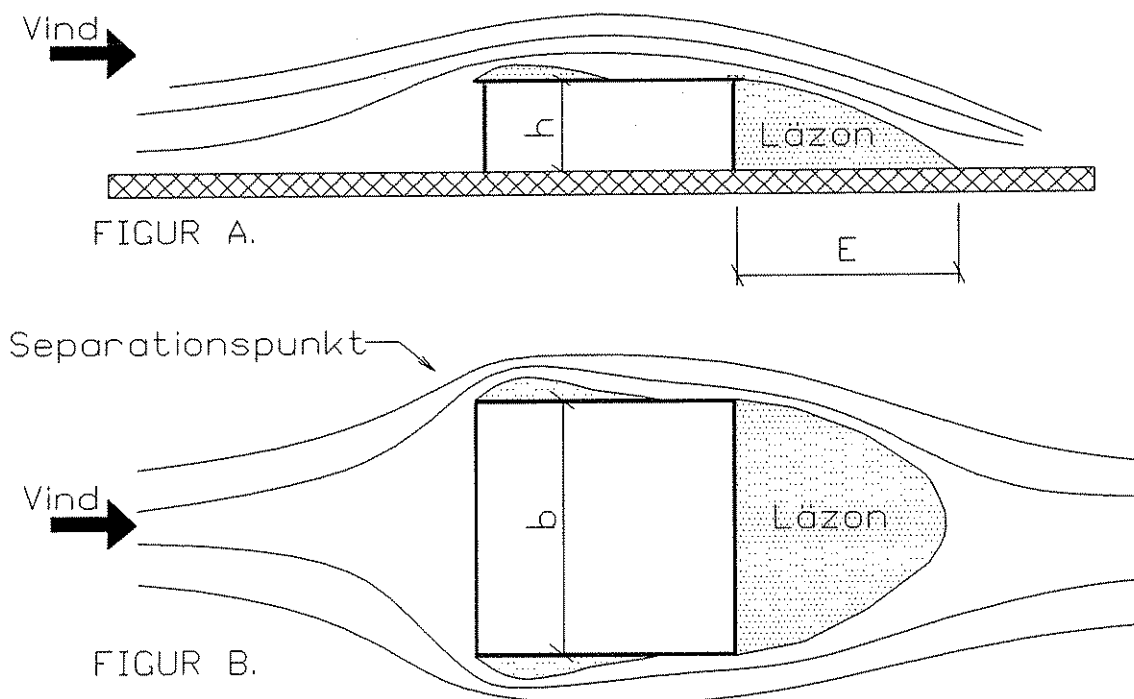
Luftrörelser runt objekt

För att kunna jämföra strömningsmönstren efter olika modeller som har samma geometri, men byggda i olika skala och studierna genomförda med olika hastighet på fluiden, kan man ta fram ett kriterium enligt Smith (1951). Kriteriet kräver att man tar fram avståndet, E , i vindriktningen från modellens läsida till den punkt där den strömmande fluiden har hastigheten 0 m/s i figur 5. Därefter beräknas kvoten mellan E och modellens höjd, h . När denna kvot fastställs för ett antal kombinationer av fluidhastighet och modellhöjd och kvoten inte varierar mer än $\pm 10\%$ är detta ett bevis på att det inte skett någon väsentlig förändring i strömningsmönstret (Smith, 1951).

Förutom kvoten E/h som kriterium vid jämförelse av strömningsmönster från modellstudier av byggnader med samma geometri, men i olika skala, behövs ett kriterium vid jämförelse av strömningsmönster av byggnader med olika geometri. Smith, (1951) visade genom försök att det finns ett sådant kriterium. Han införde begreppet aerodynamisk diameter, d_a . Den aerodynamiska diametern definieras som fyra ggr den projicerade arean, A , av byggnaden i strömningsriktningen dividerat med den projicerade omkrets, O , som luften passerar;

$$d_a = \frac{4A}{O} \quad (10)$$

$$O = b + 2h \quad (11)$$



Figur 5. A. Luftens rörelse i höjdlid när den stöter på ett byggnad. De prickade ytorna är läzoner - byggnaden sedd från sidan.

B. Luftrörelser och läzoner och luftrörelser - byggnaden sedd ovanifrån.

Genom att multiplicera den aerodynamiska diametern med medelhastigheten v fick Smith (1951) det eftersökta kriteriet, han visade att om denna produkt översteg ett visst värde, se ekvation 12, så ändrades inte kvoten E/h och därmed inte heller strömningsbilden. Kriteriet gäller för byggnader med hörn men inte för byggnader med krökta ytor som t.ex. ett runt torn. Detta förklarar Jensen (1958) med att separationspunkten på en krökt yta kan förflytta sig en relativt stor sträcka om hastigheten ändras. En byggnad med kanter däremot kan separationspunkten aldrig vara lokaliserad någon annanstans än vid dessa kanter, se figur 4.

$$vd_a \geq 4000 \quad (12)$$

Smith (1951) skriver vidare att genom multiplicera med densiteten och viskositeten så får man Reynolds tal baserat på den aerodynamiska diametern, se ekvation 13.

$$Re = \frac{vd_a \rho}{\mu} \geq 33200 \quad (13)$$

Strömningsmönster inne i byggnader

Luftförelserna inne i byggnader som påverkas av vind, kan efterliknas i modeller om Reynolds tal är 5500 eller större, (Timmons, 1980). Detta Reynolds tal baseras på inloppsöppningens höjd och hastigheten i öppningen. Timmons (1980) fann genom försök att luftförelserna inne i byggnaderna är 2-dimensionella när vinden angriper vinkelrätt från byggnadernas sidor.

SNÖ

Praktiskt kan snö anses vara den frysta formen av nederbörd med undantag för hagel. Mängden snö som har fallit mäts ofta som den mängd vatten den upptinade snön motsvarar. Fallande snöflingor kan anta många olika former. Vilken form och storlek snöflingan får är beroende av temperatur, luftfuktighet samt vindhastighet. Temperatur nära 0 °C ger stora flingor. Lägre temperatur ger mindre flingor. Ökad luftfuktighet ger större kristaller och en hög vindhastighet ger mindre kristaller.

Magano och Lee (1966) har definierat 75 huvudtyper av snöflingor som ligger till grund för vidare indelning av snöflingor. Snöns densitet är den viktigaste faktorn som påverkar dess fysikaliska och mekaniska egenskaper. Snökristallerna har en densitet på 100-700 kg/m³. Densiteten i snötäcket varierar från 10-700 kg/m³ och påverkas av temperatur och vindhastighet. Vinden har större betydelse än temperaturen för den nyfallna snöns densitet.

Partiklars rörelse i en stationär fluid

När en fast partikel rör sig i en stillastående fluid, verkar tre krafter på partikeln och som bestämmer i vilken riktning och med vilken hastighet den rör sig. Dessa krafter är gravitationskraft F_g , lyftkraft F_b och friktionskraft F_d . Riktningen på dessa krafter visas i figur 6.

$$F = F_g - F_b - F_d \quad (14)$$

$$F_g = \frac{\pi}{6} D^3 \rho_p g \quad (15)$$

$$F_b = \frac{\pi}{6} D^3 \rho_f g \quad (16)$$

$$F_d = C_D \frac{\pi}{4} D^2 \rho_f \frac{v^2}{2} \quad (17)$$

där D är partikeldiametern [m]

ρ_p är partikelns densitet [kg/m³]

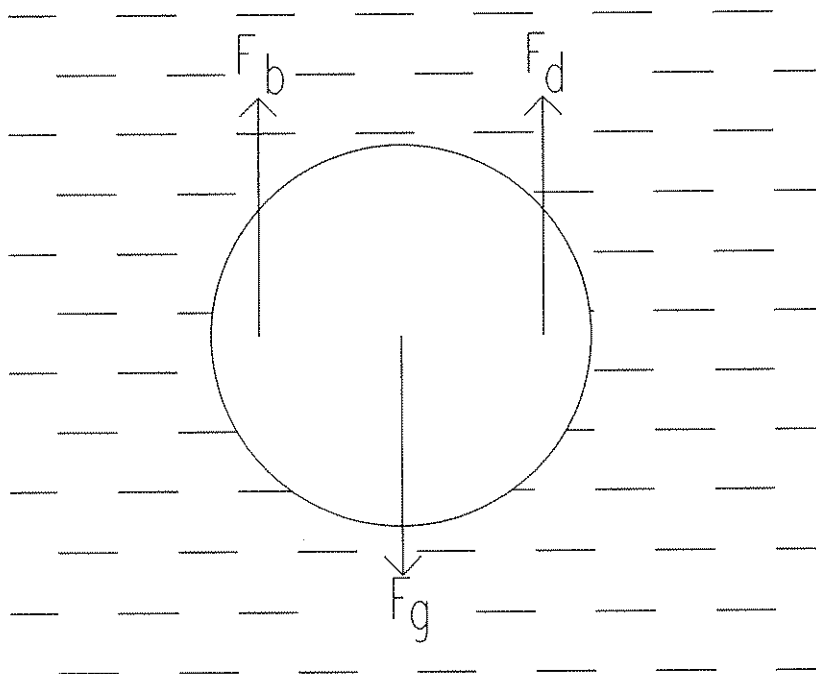
ρ_f är fluidens densitet [kg/m^3]

v är fallhastigheten [m/s]

C_D är en funktion av Reynolds tal , Re , och avläses i diagram som återfinns i strömningsteknisk litteratur. [Dimensionslöst]

Om $F=0$ samt $v \neq 0$ så befinner sig partikeln i ett jämviktstillstånd där hastigheten har uppnått sitt största möjliga värde dvs sluthastigheten v_t . Genom att sätta in ekvation 15, 16 och 17 i ekvation 14 och sätta $F=0$ kan man lösa ut sluthastigheten v_t , se ekvation 18.

$$v_t = \sqrt{\frac{4D(\rho_p - \rho_f)g}{3C_D \rho_f}} \quad (18)$$



Figur 6. Krafterna som verkar på en partikel när den faller genom en fluid.

Snötransport

Snöfall under blåsiga förhållanden gör att snödjupet varierar från ett jämt fördelat snöfall till ett inhomogent snödrev. Byggnader och andra hinder skapar lokala skillnader i vindhastigheten. Hastigheten accelereras i vissa regioner och retarderas i andra. Detta ger att fallande snöflingor ansamlas i områden med låg lufthastighet.

För att simulera nedfallande snöflingors banor är det två villkor ska uppfyllas enligt Kind (1981).

$$\left(\frac{v_t}{v}\right)_a = \left(\frac{v_t}{v}\right)_m \quad (19)$$

$$\left(\frac{v^2}{Lg}\right)_a = \left(\frac{v^2}{Lg}\right)_m \quad (20)$$

Där a står för den avbildade modellen och m för modell.

L = fasta hinders dimension som t.ex. byggnader eller staket [m]

v_t = slutliga fallhastigheten för partikeln [m/s]

v = är den opåverkade vindhastigheten i omgivningen [m/s]

Individuella snöpartiklar som ligger på ett snötäcke påverkas av den friktionskraft som vinden åstadkommer. Snöpartiklar binds tillsammans av kohesiva krafter som tillsammans med partiklarnas massa hindrar att partiklarna rör sig. Innan snödrift kan inträffa måste friktionskraften därför överstiga ett visst gränsvärde. I studier av snödrift används friktionshastigheten, U^* . Det gränsvärde på friktionshastigheten U^*_{th} där snön börjar driva beror på partiklarnas storlek, form, vikt och kohesiva krafter och kan därför variera kraftigt (Kind 1981). Vid snötemperaturer mindre än -2°C i nyfallen snö är de kohesiva krafterna negligerbara, och U^*_{th} blir densamma som fallhastigheten, och efter en mindre rörelse bryts de större partiklarna ner till mindre. Större delen av de partiklar som finns i snötäcket kommer då bestå av någorlunda lika partiklar med en diameter av 0,5 mm (Kind 1981). Gränsvärdet för när dessa partiklar kommer att röra sig, U^*_{th} , är ungefär 0,1 - 0,2 m/s där 0,15 m/s är ett ofta använt medelvärde (Kind 1976). De kohesiva krafterna är större vid våt och åldrad snö än vid nyfallen snö.

Vind rör sig som en turbulent fluid, där virvlar cirkulerar på ett oregelbundet sätt. Nära ytan är det hastighetskomponenten uppåt (och neråt) i dessa virvlar som har betydelse för om snön ska röra sig i höjdlid. Hastigheten i dessa virvlar närmar sig snöpartiklarnas slutliga fallhastighet om friktionshastigheten U^* är större än $5U^*_{th}$ (Bagnold 1973). Till exempel för ett snötäcke med $U^*_{th} = 0,15$ m/s måste U^* vara 0,75 m/s för att den vertikala hastigheten ska vara ungefär lika med fallhastigheten. I naturen kan vindhastigheter på 14 m/s vid 1 m:s höjd åstadkomma friktionshastigheter med den storleken, men dessa är sällsynta (Kind 1981).

Transport av små partiklar över en yta kan ske på tre olika sätt nämligen genom suspension ($U^* > 5U^*_{th}$), saltation ($U^*_{th} < U^* < 5U^*_{th}$) och krypande ytor. Schneider (1962) påstår att alla tre sätten kan ske samtidigt i ett snödriv.

Tabell 2. Sammanställning av gränsfriktionshastigheten, U^*_{th} , vid olika snötäcken. Efter Kind 1981.

Beskrivning	Ythårdhet ^a kPA	Densitet Kg/m ³	Temperatur °C		U^*_{th} m/s
			Snö	Luft	
Exceptionellt lätt och torr snö					0,07
Lös nyfallen snö	0,10	50	< -2,5		0,15
Flera timmar åldrad torr snö				-7	0,22
Nyfallen snö vid 0 °C			0		0,25
Något packad torr snö	0,9	120	-5,5		0,27
Flera timmar åldrad torr snö			-1		0,4
Gammal, hård snö					0,4
Av vind hårdnad snö	100	350		-15	0,4
	250	400		-15	1,0

a) Ythårdheten definieras som det erforderliga trycket för att ytan ska kollapsa.

Suspension

Om U^* är större än $5 U^*_{th}$ kan snöpartiklar föras högt upp i luften och vara kvar där i ett tillstånd som kan liknas vid suspension och följa med vinden.

För att simulera suspension anses följande nio variabler signifikanta för att etablera skalfaktorer, (Keitz et al, 1962).

L = mått på fasta hinder som t.ex. byggnader eller staket [m]

I = mått på snökristallens rörelser [m]

D = snökristallens diameter [m]

m = snökristallens massa [kg]

v_p = snökristallens hastighet [m/s]

v = vindens medelhastighet i omgivningen [m/s]

ρ_f = luftens densitet [kg/m³]

μ = luftens dynamiska viskositet [Pa*s]

g = tyngdkraftens acceleration [m/s²]

Genom att använda dessa variabler för att forma dimensionslösa tal får man ekvation 21.

$$\frac{I}{L} = f\left(\frac{D}{L}, \frac{v_p^2}{gD}, \frac{m}{D^3 \rho}, \frac{v_p}{V}, \frac{v_p D \rho_f}{\mu}\right) \quad (21)$$

I/L kan tolkas som ett mått av geometrisk similaritet av partikelns rörelser i förhållande till fasta objekt. I ekvation 21 ska varje dimensionslöst tal inom parentes behålla samma värde i såväl modell som i verkligheten för att similaritet av partikelns rörelser ska bevaras i modellen.

Den första skalfaktorn D/L innebär att kvoten mellan kristallens storlek och modellens storlek ska vara densamma i både det verkliga fallet och i modellen. Keitz et al (1962) skriver att det kan vara svårt att uppfylla detta villkor med hänsyn till de andra faktorerna.

Faktorn $\frac{v_p^2}{gD}$, ge, att kvadraten av kristallens hastighet delat med kristallens diameter ska vara samma i båda fallen. Denna faktor ger tillsammans den sista faktorn (se nedan) vägledning vilka materialegenskaper som behövs för att simulera snösuspension. Det dimensionslösa talet $\frac{m}{D^3 \rho}$ är ett mått på lyftkraften som agerar på kristallen.

Då densiteten på snökristallen är så mycket större än luftens densitet blir lyftkraften liten i förhållande till de andra krafterna som verkar i en snödrift. Keitz et al (1962) rekommenderar därför att man i vindtunnlar negligerar denna faktor, medan Naraine (1966) påpekar att i ett strömningsbord blir flytkraften så stor att den inte kan negligeras.

Kvoten v_p/V kräver att kvoten mellan kristallens hastighet och fluidens medelhastighet är lika.

Den sista faktorn är en form av Reynolds nummer för en fallande partikel, motståndsfaktorn C_d är den enda faktor som är beroende av Reynolds tal och måste därför väljas så att C_d är lika i modell och simulation.

Saltation (hoppande partiklar)

Saltation är ett engelskt ord för det nedan beskrivna fenomenet och kan närmast översättas med hoppande partiklar. Den största delen av den mängd snö som förflyttas över ett snötäcke sker genom att iskristaller slår i snötäcket, studsar upp igen och förs med vinden ytterligare en bit bort i vindriktningen. Hur långt beror på kristallernas elastiska och plastiska egenskaper. Om snötäcket exempelvis har en yta bestående av partiklar som är hårda och inte lossnar från varandra, kommer lite energi att förloras i kollisionen och den nedfallande partikeln att studsas upp en relativt lång sträcka i luften. Hoppande partiklar bromsar upp den omgivande luften på samma sätt som ytojämnheter och Kind (1981) visar att ekvation 8 kan skrivas som i ekvation 22 för att bestämma vindprofilen i en snödrift.

$$v(z) = \frac{U^*}{K} \ln\left(\frac{2gz}{U^{*2}}\right) + 9,7U^* \quad (22)$$

Vinden har stor betydelse för detta förlopp, då en låg vindhastighet gör att partiklarna efter kollisionen inte återfår all den energi som förlorades i kollisionen. Hoppandet fortgår då för ett tag, men dör eventuellt ut.

Kind (1981) skriver att för på ett korrekt sätt kunna simulera "hoppande partiklar" över en plan yta utan hinder måste följande villkor vara uppfyllda.

$$\left(\frac{U_{th}^*}{v}\right)_a = \left(\frac{U_{th}^*}{v}\right)_m \quad (23)$$

$$\frac{U_{th}^{*3} \rho_f}{2g\mu} > 30 \quad (24)$$

där U_{th}^* är gränsvärdet för friktionshastigheten [m/s]

v är vindhastigheten i omgivningen [m/s]

ρ_f är densiteten för fluiden [kg/m^3]

μ är den dynamiska viskositeten [Ns/m^2]

Krypande ytor

Det engelska ordet för detta fenomen är *surface creep*. När partiklar slår i ytan överförs en del av energin till andra partiklar som stiger upp i luften. Men den största delen av energin absorberas av andra partiklar, som har svårt att röra sig på grund av de kohesiva krafterna mellan partiklarna. De partiklar som inte stiger upp i luften kommer då att långsamt att flytta sig framåt under den kontinuerliga "bombningen". Bagnold (1973) och Kind (1981) skriver att även om det inte finns någon klar distinktion mellan rörelsen hos krypande och hoppande partiklar som rör sig nära ytan, så finns det en klar skillnad

mellan orsakerna till att de rör sig. Hoppande partiklar får sin rörelseenergi från det tryck som vinden utövar på partikeln efter att den har studsat upp. I krypande ytor är partiklarna opåverkade av vinden utan får sin rörelseenergi när hoppande eller nedfallande partiklar kolliderar med ytan.

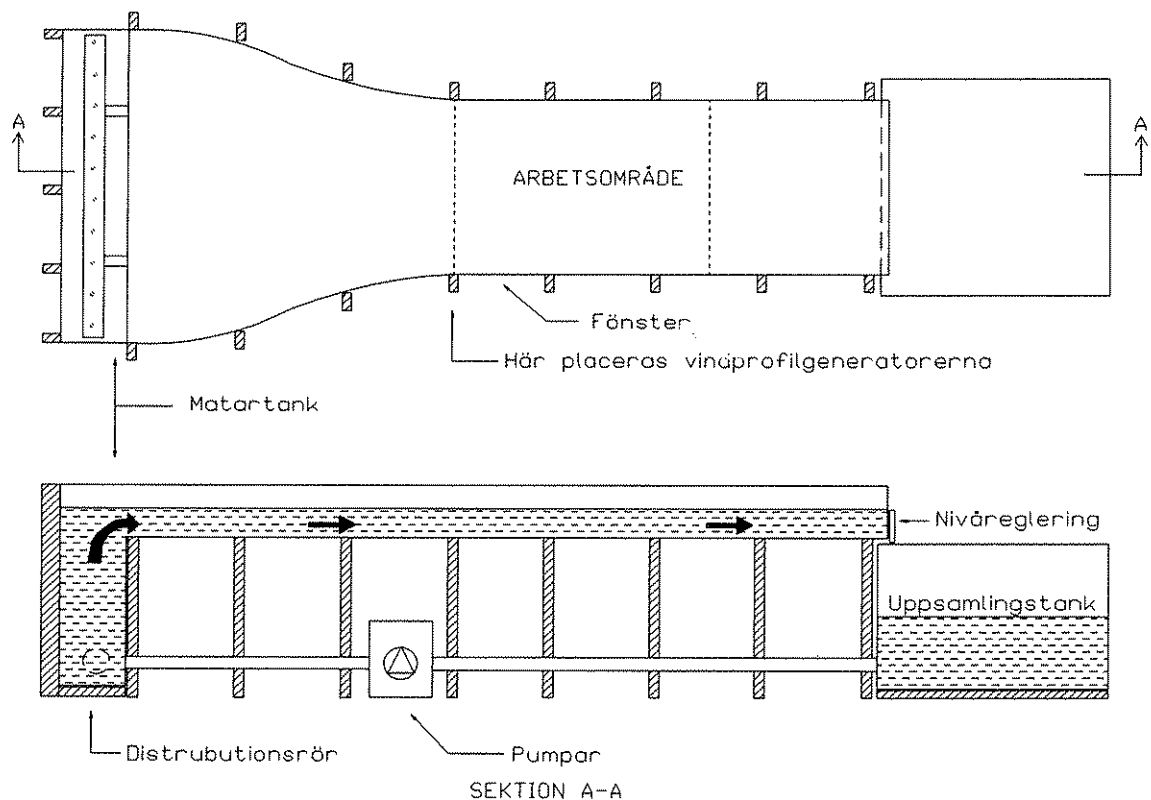
FÖRSÖKSUTRUSTNING

Syftet med försöken är att dokumentera att strömningsbordet kan användas som ett tillförlitligt verktyg i studier av luft rörelser, snöfall och snödrev kring byggnader, samt för att undersöka luft rörelser i byggnader.

Strömningsbord

Strömningsbordets utseende visas i figur 7. Det har byggts efter förebilder från Centre for Rural Buildings, Scottish Agricultural College, Aberdeen i Skottland och School of engineering, University of Guelph, Guelph i Kanada. Strömningsbordet fungerar enligt följande: Vattnet i uppsamlingstanken pumpas genom slangar till distributionsröret i matartanken. I matartanken strömmar vattnet uppåt, för att sedan ändra riktning och flöda ut över bordet. Bordets första del har en successivt minskande tvärsnittarea, för att få en jämn hastighet över hela tvärsnittet i arbetsdelen. Nästa del medströms är arbetsdelen, som har en konstant tvärsnittarea och där placeras modellen(erna). Vattennivån på bordet regleras i slutet av bordet med en höj- och sänkbar skiva. Efter denna skiva faller vattnet ner i uppsamlingstanken, för att på nytt kunna pumpas runt.

Man kan använda strömningsbordet till att undersöka både två- och tredimensionella luft rörelser, det vill säga att antingen kan man bygga en modell av en sektion eller en hel byggnad.

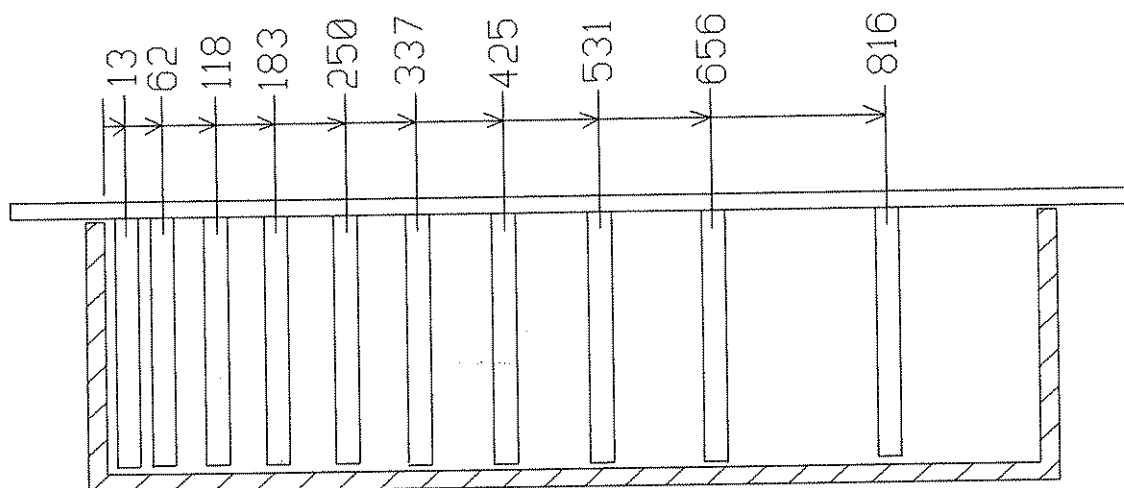


Figur 7. Strömningsbordet sett ovanifrån samt från långsidan.

Vindprofilsgenerator

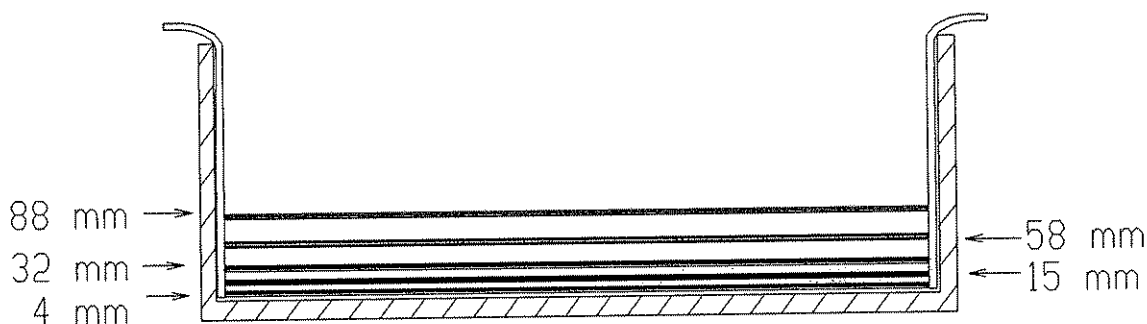
För att åstadkomma en hastighetsprofil som liknar den naturliga vindens måste man störa/omfördela flödet i strömningsbordet. Detta kan göras på olika sätt, men det mest yteffektiva är att i flödet placera runda profiler på en linje en sk vindprofilsgenerator. Vindprofilsgeneratorernas placering i strömningsbordet framgår i figur 8.

Vid tvådimensionella prov av byggnadssektioner användes en vindprofilsgenerator gjord av runda träprofiler med en diametern 25 mm, se figur 9.



Figur 8. Vindprofilgeneratoren för 2-dimensionell visualisering där träprofilernas mått till strömningsbordets kant är utsatta.

Vid tredimensionella prov av byggnader användes runda stålrör med diametern 6 mm för att störa flödet, se figur 9.



Figur 9. Vindprofilgeneratoren för 3-dimensionell simulering. De utsatta måtten anger höjden över bordet till centrum på röret.

Flygel

För att kunna mäta vattnets hastigheter i vissa försök användes en flygel. En flygel består av en propellerdel samt en loggenhet. När propellern roterar så räknar loggern antalet pulser under en valbar tidsperiod. Den flygel som användes i försöken hade en propellerdiameter på 20 mm och man kunde välja att mäta under en tidsperiod av 1 s, 10 s eller 60 s. Hastigheten visades sedan i ett fönster på loggenheten.

Visualisering av vattenrörelser

För att kunna se hur vattnet rör sig runt och i modellerna tillsattes en blå karamellfärg lokalt. Färgen blandas dock ut med vattnet och blir svårt att urskilja efter ett tag. Därför kan man ibland använda babypuder för att illustrera luft rörelser, pudret blandar sig inte med vattnet utan flyter på vattenytan vilket begränsar dess användning till tvådimensionella försök.

Kiselsand

För att illustrera snö valdes en kiselsand. Sandpartiklarna hade en diameter som bestämdes med siktanalys till 0,1-0,3 mm. Kiselsanden hade en sann densitet av 2750 kg/m^3 . Med sann densitet menas att volymen har korrigerats för tomma rum mellan partiklarna.

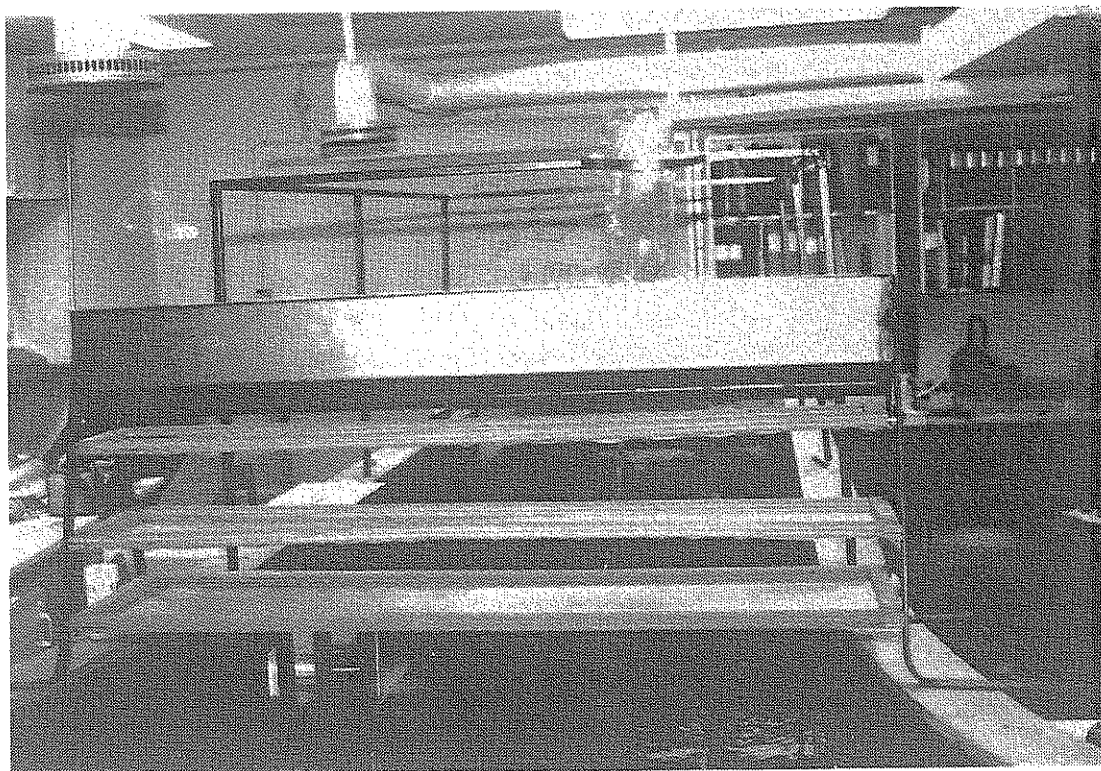
Modellmaterial

Modellerna byggdes i polystyrenplast som limmades med diklormetan. Diklormetan smälter plasten där den appliceras och torkar fort.

Sandlåda

För att efterlikna snöfall och snödrev i försök är det viktigt att kontrollera vilken mängd sand som placeras i strömningsbordet både per tidsenhet (Naraine, 1966) och total mängd. Viktigast är dock att fördelningen över tvärsnittet blir jämn. Efter en kanadensisk förebild (Naraine, 1966) konstruerades en sandlåda vars principiella utseende framgår av figur 10. Lådans botten är genomborrad på var fjärde cm med 6 mm:s hål. Under botten löper en skena som är genomborrad på samma sätt, denna skena kan skjutas så att hålen kan varieras från helt stängda till helt öppna.

För att sanden inte skulle rinna direkt ner i strömningsbordet, placerades tre ramar med finmaskigt nät under tratten, så att flödet av sand fick en effektiv bredd, vinkelrätt mot vattenflödet, på 15 cm när sanden föll i vattnet.



Figur 10. Sandlåda för spridning av kiselsand i det rinnande vattnet. Observera de tre ramarna med finmaskigt nät som ger sanden en bredare fördelning i längsled.

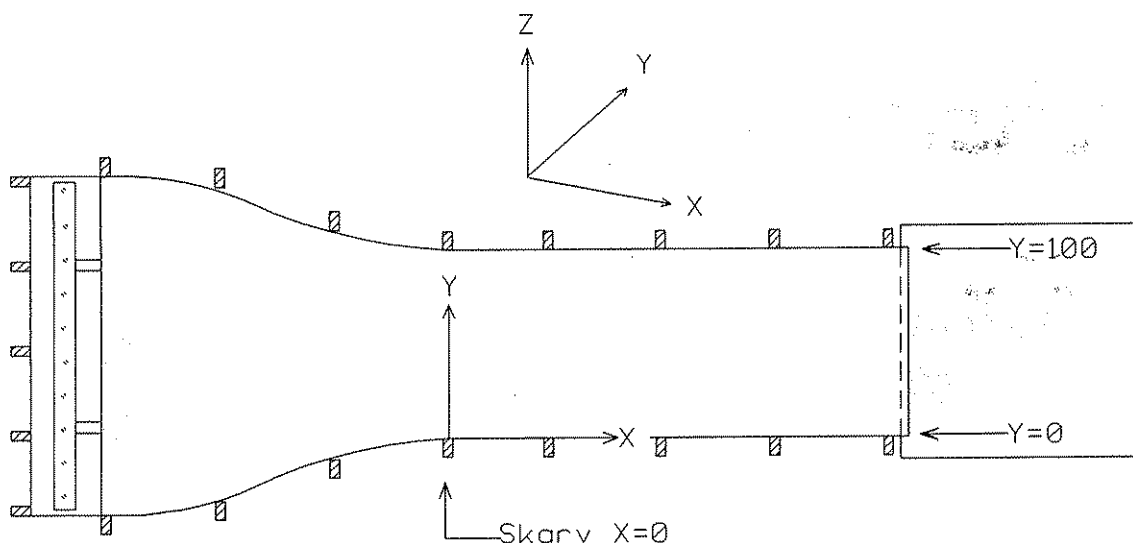
Fotodokumentation

Försöken dokumenterades, där så behövdes, med en videokamera som var placerad i en ställning över vattenbordet. Här vill författaren genast framhålla videokamerans överlägsenhet framför en traditionell kamera i för att visualisera strömningsbilder. Med en videokamera kan man fånga ett helt förlopp för att sedan återuppspela det igen och i lugn och ro kontrollera att man inte missat någon detalj. Ett vanligt foto kan inte på samma sätt förmedla rörelser, speciellt inte i tre dimensioner.

En extra poäng med att använda en videokamera är den inbyggda klockan som förvandlar kameran till ett mätinstrument. Genom att i strömningsbordet placera ett rutnät med kända mått, kan man mäta hastigheter med god precision. Dessutom kan man återupprepa mätningen utan att återupprepa försöket, vilket torde vara unikt. Ett fel inträffar dock vid hastighetsmätning i ett strömningsbord, då ljus som faller in snett mot en vattenyta bryts i övergången från luft till vatten.

TEST AV STRÖMNINGSBORD

Under alla försök har placering av modeller eller mätpunkter utgått från ett XYZ-system enligt figur 11.



Figur 11. Strömningsbordet sett ovanifrån med referens X-Y-Z axlar. Mått angivna i cm.

Test av ostörd strömningsprofil

Syfte

Syftet med dessa försök var att dokumentera hastighetsprofilens utseende i strömningsbordet med ett ostört flöde och med två olika vattendjup (6 cm och 15 cm) samt undersöka vattenhastighetens variation längs med och tvärs över strömningsbordet.

Utförande

Vattenhastigheterna mättes vid ett vattendjup av 6 cm. Undersökningen utfördes med hjälp av flygeln. Hastigheten uppmättes i fyra tvärsnitt av strömningsbordets arbetsdel med ett intervall av 30 cm. Längs varje tvärsnitt uppmättes hastigheten med ett intervall av 10 cm samt närmast kanterna. Flygeln mätte hastigheten under en 10 s period. Hastigheterna mättes på 3 cm:s under vattenytan.

Vattendjupet ställdes sedan in på ett djup av 15 cm och hastigheten uppmättes i tre tvärsnitt i arbetsdelen med ett intervall av 30 cm. Längs varje tvärsnitt mättes hastigheten i tre punkter med ett intervall av 25 cm. I dessa punkter mättes hastigheten på olika djup för att få fram en hastighetsprofil i djupled dvs z-led.

Resultat

- Resultaten visar att hastigheterna i strömningsbordet är jämna över tvärsnittet men avtar successivt med ett ökande X-värde. Den minskande hastigheten beror på att vattendjupet ökar ju närmare utloppet, från 6,0 cm:s djup vid $X=30$ cm till 6,5 cm:s djup vid $X=120$ cm. Hastigheten var i genomsnitt 0,24 m/s vid detta försök. För utförligare resultat hänvisas till tabell 7 i appendix.
- I försöket med ett vattendjup på 15 cm bedömdes inte hastigheten efter $X=90$ cm vara intressant på grund av att inga snöförsök kan utföras så långt bort från sandlådan och någon större förändring förväntades inte. Resultaten visar att hastigheterna är jämna både i längsriktning och i tvärsnitten med en viss tendens att hastigheten blir lägre ju större Y blir. Hastigheten var i genomsnitt 0,09 m/s och resultaten finns i tabell 8 i appendix.

Test av vindprofilgeneratorer

Syfte

Syftet i dessa försök var att undersöka hur hastighetsprofilen i vattnet förändrades när vindprofilgeneratorerna placerades i strömningsbordet.

Utförande

- Vindprofilgeneratorn för tvådimensionell simulering placerades i strömningsbordet. Vattendjupet var 6 cm. Hastigheten mättes i samma punkter som i försöket med ostörda strömningsprofil. Vindprofilgeneratorn vändes och hastigheterna mättes ännu en gång.
- Nästa steg var att vindprofilgeneratorn för tredimensionell simulering placerades i strömningsbordet och vattendjupet var 15 cm. Hastigheterna mättes i samma punkter som i det tidigare försöket med 15 cm:s vattendjup.

Resultat

Resultaten finns redovisade i tabell 9a och 9b (6 cm:s djup) och i tabell 10 (15 cm:s djup) i appendix. Genom att utifrån resultaten beräkna skrovlighetsparametern kan friktionshastigheten U^* i ekvation 8 beräknas. Skrovlighetsparametern z_0 är intressant då man, enligt ekvation 9, kan få fram vilken skala modellerna bör vara.

Ett sätt att lösa ut skrovlighetsparametern är att i ett lin-log diagram avsätta hastigheten på x-axeln (lin) och höjden y-axeln (log). Om kurvan förlängs så att den skär y-axeln får man skrovlighetsparametern. Detta gjordes och för den tvådimensionella vindprofilgeneratoren blev skrovlighetsparametern $z_0 = 7,5 \cdot 10^{-4}$ m och för den tredimensionella blev $z_0 = 3,0 \cdot 10^{-4}$ m. Värdena för z_0 användes för att beräkna lämplig skala enligt ekvation 9, se tabell 3, samt för att beräkna friktionshastigheten.

Tabell 3. Lämpliga skalor på 2- och 3-dimensionella modeller för användning i strömningsbordet.

Terrängklass	Skala 2-dimensionella	Skala 3-dimensionella
0=öppet vatten	4:1	3:2
1=öppen slätt	1:40	1:100
2= spridd skog och bebyggelse	1:133	1:333
3=städer, skogslandskap	1:533	1:1333

Friktionshastigheten beräknades vid ett djup av 1,2 cm, då det är hastigheten nära marken/strömningsbordets yta som kommer att ha betydelse för snödrift. Friktionshastigheten $U^*_{1,2}$ är $6,6 \cdot 10^{-3}$ m/s. Det villkor Kind (1981) beskrev i formel 24, som var att parametrarna i det vänstra ledet skall vara större än 30, kan därför inte uppfyllas. Detta innebär att, av de tre sätten som snödrift kan finnas i naturen, så är endast krypande ytor möjligt att simulera i strömningsbordet.

Test av sanddeponering

Syfte

Syftet är att ta reda på hur distributionen av kiselsand i strömningsbordet blir i både strömningsriktningen och vinkelrätt mot denna, för att få fram hur modellen ska placeras i strömningsbordet och vilken storlek modellen kan tillåtas ha.

Utförande

Exakt 3,95 kg kiselsand placerades i matarbingen. Vindprofilgeneratoren placerades i strömningsbordet. Vattendjupet reglerades till 15 cm och "snömaskinen" öppnades till markeringen för halva hålarean. Efter att all sand hade runnit ut, fortsatte försöket i ytterligare 15 minuter innan pumparna stängdes av. Vattnet fick rinna av långsamt från vattenbordet så att sanden inte skulle flytta på sig. All sand trängde inte ner i vattnet utan flöt på vattenytan och följde med vattnet ner i tanken.

Resultat

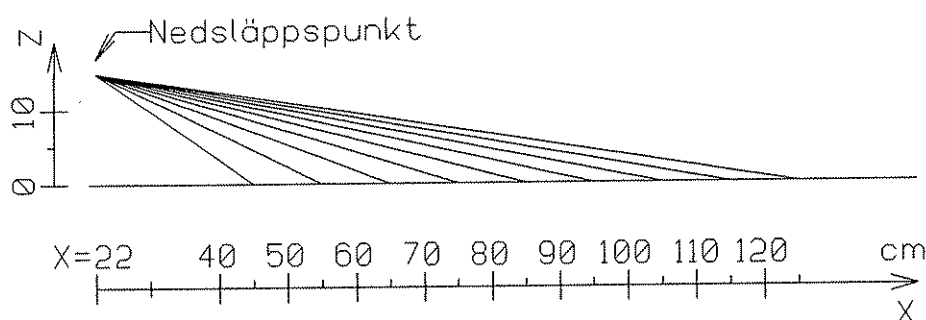
Efter att sanden hade torkat i strömningsbordet, mättes sanddjupet med en linjal. Mätpunkterna var placerade i ett kvadratisk rutmönster med sidan 10 cm. Resultaten visade att sanden var jämt fördelad längs med strömningsbordet, men mer sand deponerades tidigare på den vänstra sidan (stort Y) än på resten av bordet. Den torkade sanden samlades upp i remsor med kortsidan 10 cm och vägdes på en Mettlervåg och resultaten återfinns i tabell 4.

Tabell 4. Fördelningen av sand på olika avstånd från början av mätsträckan, $X=0$, i strömningsbordet figur 11.

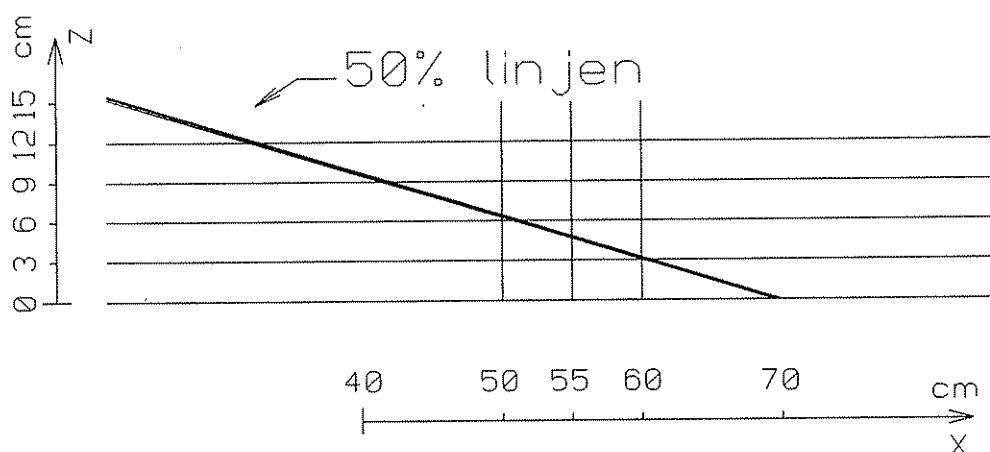
Avstånd X-X [cm]	Massa sand [g]	Procentuell andel ackumulerad
=> 50	110,4	3,0
50-60	514,7	17,1
60-70	902,1	41,7
70-80	817,0	64,0
80-90	606,0	80,6
90-100	311,1	89,1
100-110	191,0	94,3
110-120	102,8	97,1
120 =>	105,6	100,0

Det område i strömningsbordet som verkar bra att placera modellerna i, ligger ungefär mellan $X=60$ och $X=80$. Detta område kan utökas till $X=55$ till $X=85$ då förändringarna av deponeringen sker gradvis. Detta framgick klart under mätningarna av sanddjupet.

Om man i ett diagram drar linjer från en tänkt nedsläppspunkt till det intervall i x-led där sanden landat så kan få fram hur hög en modell får vara och var den ska placeras för att den sanden ska passera modellen, se figur 12. Intressant utgångspunkt är den linje som förbinder vattendjup där 50 % av all sand finns uppströms. Denna linje finns inritad i figur 13. Även om denna linje är baserad på antaganden, som att all sand faller ner symmetriskt både kring $X=22$ cm och inom det aktuella x-intervallet, så ger linjen en god vägledning om var modellen bör placeras.



Figur 12. Linjer som visar partiklarnas teoretiska bana under fall i strömningsbordet när vattenhastigheten är 0,09 m/s. De största partiklarna deponeras först och kommer att följa linjerna med brant lutning. De minsta partiklarna deponeras längst bort från nedsläppspunkten. Om hastigheten på vattnet ökar kommer samtliga linjer få en flackare lutning.



Figur 13. Teoretisk linje i strömningsbordet som visar det vattendjup på som behövs vid olika avstånd från nedsläppspunkten, för att 50 % av den nedsläppta sanden skall finnas såväl ovanför som under detta djup. Vattenhastighet 0,09 m/s.

Diskussion av testerna med strömningsbordet

Det minsta värde som flygeln kunde mäta var 0,01 m/s, detta medför att de hastigheter som uppmättes under försöken (0,06-0,29 m/s) hade stora mätfel. Ett annat problem är att hastigheten inte mäts momentant, utan över en tidsperiod, så att en skillnad på 0,01 m/s kan härröra från en enda puls. Ett tredje problem med att använda flygeln för att mäta hastigheter, är att flygeln mäter över tvärsnitt med diametern 2 cm. Detta är en nackdel när skrovlighetsparametern skall beräknas, då vill man kunna mäta hastigheten i

många punkter på täta avstånd intill botten på strömningsbordet. Sammanfattningsvis ger problemen med hastighetsmätningen att det kan bli stora fel vid framtagande av skrovlighetsparametern, då lutningen på kurvan ändras mycket med hastigheten. Detta ger att de skalor lämpliga för modeller som angetts i tabell 7 ska ses som vägledning och inte som absoluta sanningar.

Sandens fördelning i strömningsbordet över tvärsnittet var tillfredsställande. I strömningsriktningen hade det dock varit önskvärt med en jämnare fördelning. Den ojämna fördelning orsakas av sandens ojämna storleksfördelning. Med befintlig kornstorleksfördelning hos sanden är sandeponeringen vid olika modeller helt jämförbara. Att överföra resultat från försök till verkligheten är mer osäkert. I de fall man mäter höjden av den deponerade sanden så tillkommer faktorn att volymen mellan partiklarna ökar när partikelstorleken minskar. Detta innebär att ju längre från sandlådan deponeringen sker desto mindre densitet kommer den deponerade sanden att ha. Följaktligen måste den uppmätta höjden av sanden korrigeras för att massan sand är mindre. Detta bidrar till att minska problemet med den ojämna fördelningen i strömningsbordet, i vilken utsträckning är dock okänt.

Villkoren, enligt litteraturgenomgången, för snöfall är uppfyllda, vilket inte gäller för alla fall av snödrift. De fall av snödrift som inte kan efterliknas i detta strömningsbord kan ändå observeras i modellförsöken längs med modellernas kanter då hastigheten där kan bli tillräckligt hög.

EGNA FÖRSÖK

Bakgrund

Effekter av olika öppningars geometri på luftrörelser inomhus

Syftet är att undersöka hur luftrörelserna i en tvådimensionell modell av en byggnad med öppen framsida påverkas av olika geometrier på öppningen i bakväggen av byggnaden. Modellerna hade lika stor sammanlagd öppningsarea i bakväggen. I Sverige används denna typ av stallar främst till köttjursuppfödning och uppfödning av ungdjur från mjölkkraser. I de västra delarna av Nordamerika är denna typ av byggnader mycket populär främst på grund av sin låga byggkostnad och det enkla uppförandet, (Darby, 1968).

Placering av två byggnader med olika utformning

Syftet är att undersöka hur man kan placera ett nytt stall med öppennock (låghus) i förhållande till ett gammalt stall (höghus), så att man undviker yttre vindpåverkan som får negativa konsekvenser för driften i dessa stallar. Denna situation är ofta förekommande för den lantbrukare som planerar att utöka sin produktion. För att begränsa antalet möjliga kombinationer har det antagits att byggnaderna ska vara sammanbyggda. Detta antagande är realistiskt på grund av de transporter mellan stallen av djur och foder mm. För att ytterligare begränsa antalet kombinationer har givits byggnaderna samma bredd. Detta är inte lika realistiskt, då de byggnader som byggs idag ofta har en spännvidd som är betydligt större än de befintliga.

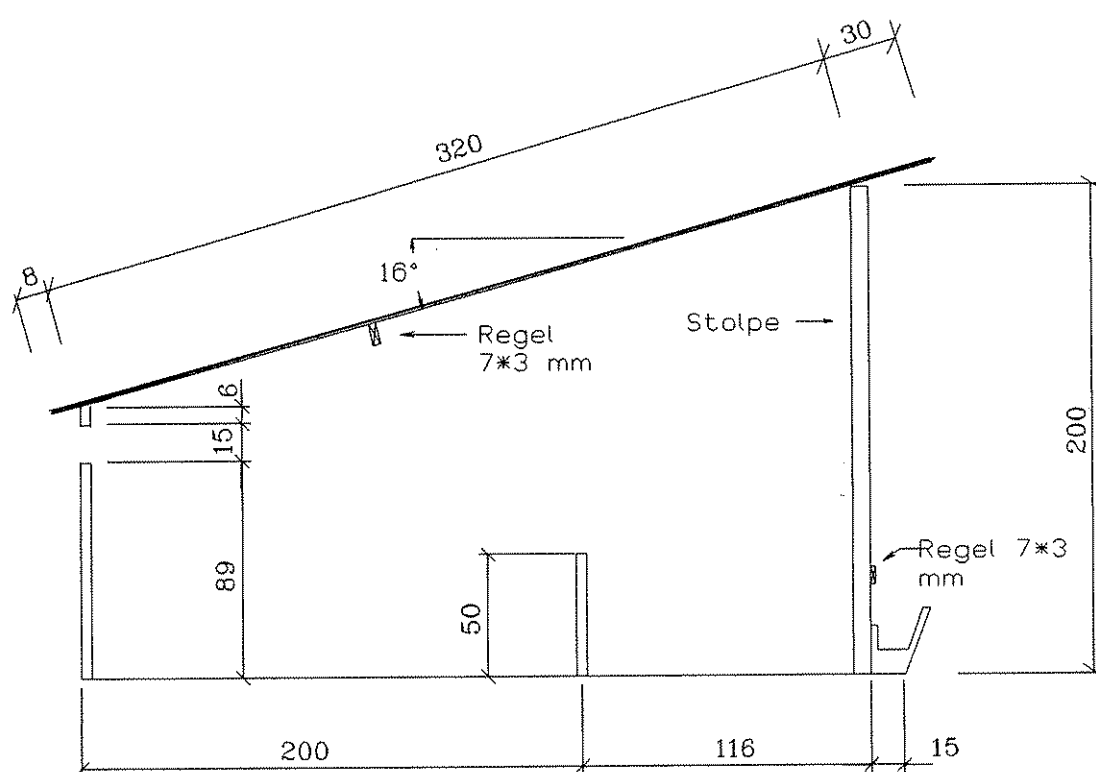
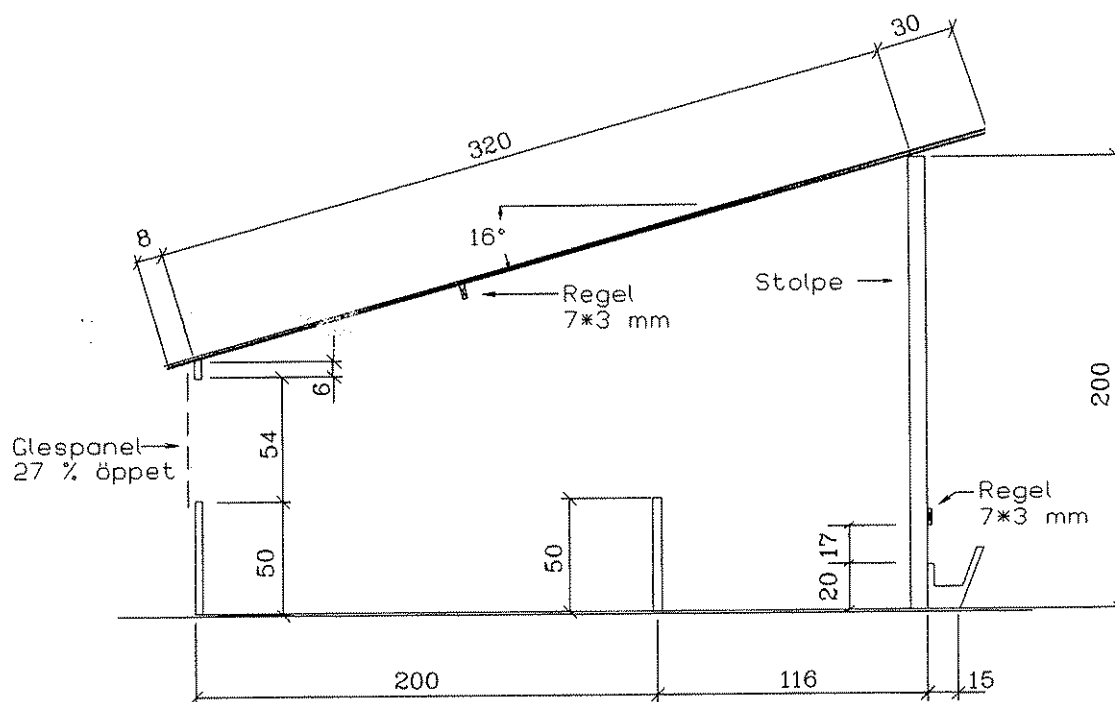
Reducering av snöproblem vid byggnader med öppen front

Byggnader med en öppen framsida har problem med att mycket snö ansamlas på framsidan och driver in i byggnaden när vinden ligger på bakifrån. I detta försök provas hur man kan åtgärda detta.

Effekter av olika öppningars geometri på luftrörelser inomhus

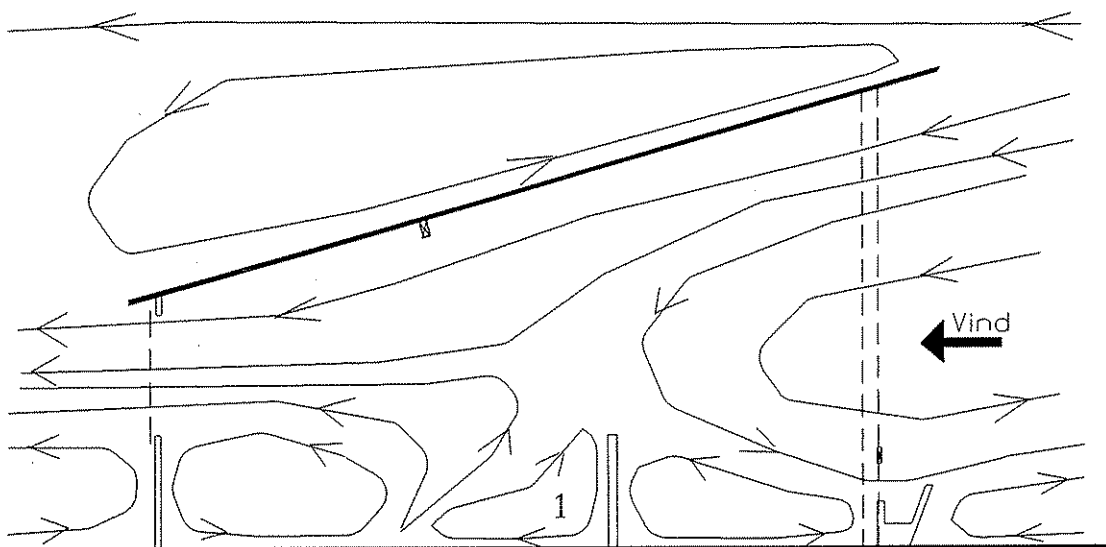
Utförande

Två olika sektioner av ett stall med öppen front placerades i strömningsbordet. Skillnaden mellan modellerna bestod i att baksidorna var olika, den ena modellen hade glespanel (figur 14) och den andra hade en längsgående öppning längs med takfoten, (figur 15). Öppningsarean var dock densamma i båda modellerna. Ett kvadratisk rutemönster där varje ruta hade sidan 1 cm ritades in i botten av modellen. Vattendjupet reglerades till 5,2 cm:s djup. Båda modellerna provades med strömningsriktning både framifrån och bakifrån. Videokameran var påslagen och filmade hela förloppet. Modellerna hade ingen direkt förebild i verkligheten, därför har måtten angetts för modellerna, men skalan är tänkt att vara 1:30.

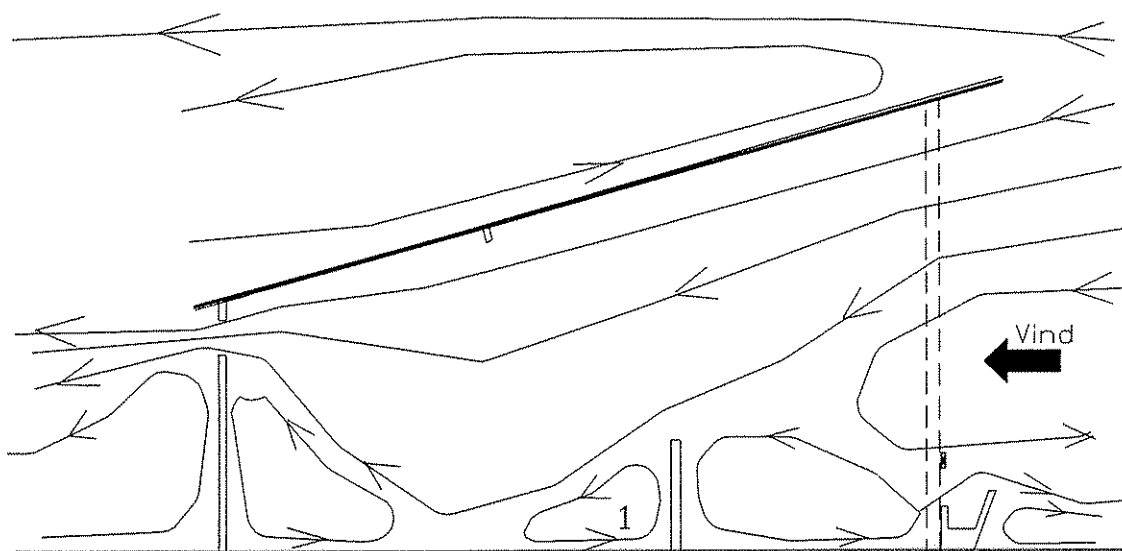


Resultat

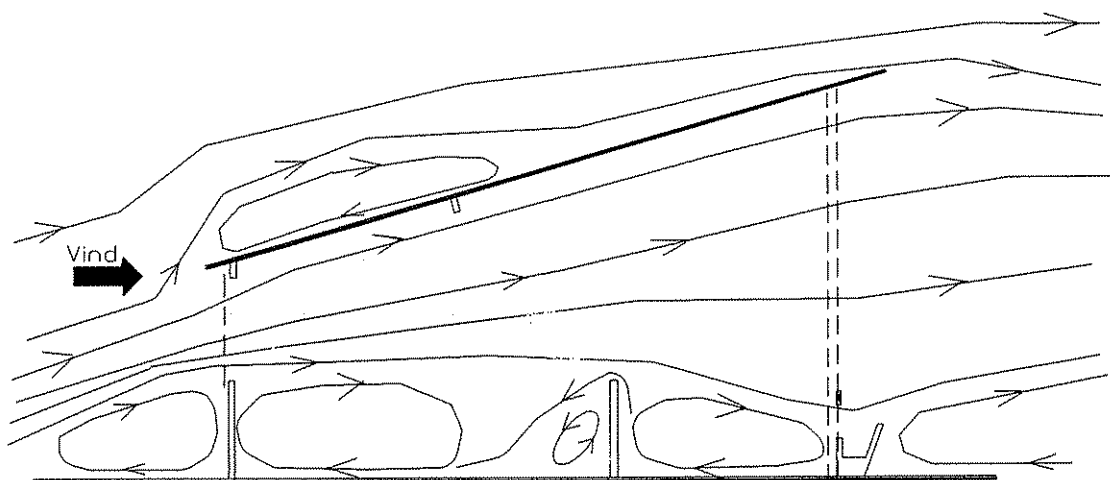
Resultaten finns illustrerade i figur 16, 17, 18 och 19. Med vind framifrån och glespanel i bakväggen, se figur 16, tränger vatten genom hela byggnaden endast närmast taket. Det mesta vattnet passerar ej mellanväggen utan vänder ut igen. Hastigheterna bakom mellanväggen blir därför låga i djurnivå. Med längsgående spalt i bakväggen, se figur 17, sker en betydligt mer markant genomströmning av hela stallsektionen även bakom mellanväggen. Noteras bör att virvel 1 ändrar rotationsriktning mellan figur 16 och 17.



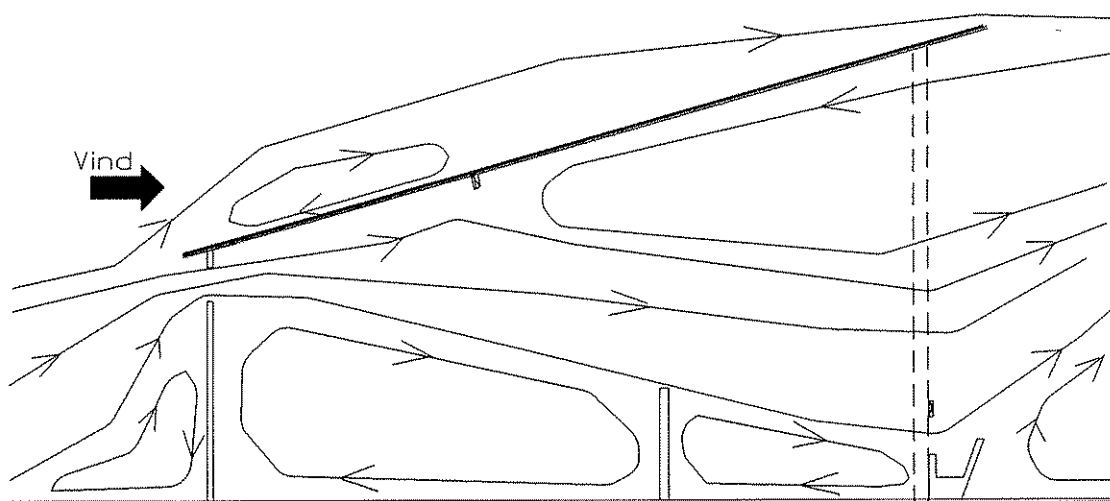
Figur 16. Strömningsmönster i en modell av en sektion av en byggnad med öppen front och glespanel i bakväggen. Vindriktning framifrån.



Figur 17. Strömningsmönster i en modell av en sektion av en byggnad med öppen front och öppen spalt i bakväggens övre kant. Vindriktning framifrån.



Figur 18. Strömningsmönster i en modell av en sektion av en byggnad med öppen front och glespanel i bakväggen. Vindriktning bakifrån.



Figur 19. Strömningsmönster i en modell av en sektion av en byggnad med öppen front och öppen spalt i bakväggens övre kant. Vindriktning bakifrån.

Med öppen spalt i bakväggens övre kant och vind bakifrån, figur 19, styr åsen som bär upp taket mitt i stallet ner den koncentrerade vattenströmmen som åstadkommes av spaltöppningen. Den snett nedåtriktade kraftiga rörelsen finns hela vägen genom stallet fram till foderbordet där vattenströmmen styrs kraftigt uppåt. Den kraftiga nedåtriktade rörelsen skapar också en stor "läzon" under taket vid framsida. Där rör sig luften långsamt motsols. I utrymmet mellan bak- och mellanvägg bildas indirekt en medsols vattenvirvel. Med glespanel i bakväggen, figur 18, får inte takåsen någon effekt på rörelsemönstret, den indirekta virveln blir mindre och får lägre hastighet.

Vid uppritandet av rörelserna inne i byggnaden var rutmönstret till stor hjälp för att korrekt kunna illustrera dessa rörelser. Rörelserna i figurerna är de som oftast var förhärskande, ibland kunde dessa förändras för en kort tid för att sedan återgå till det normala.

Diskussion

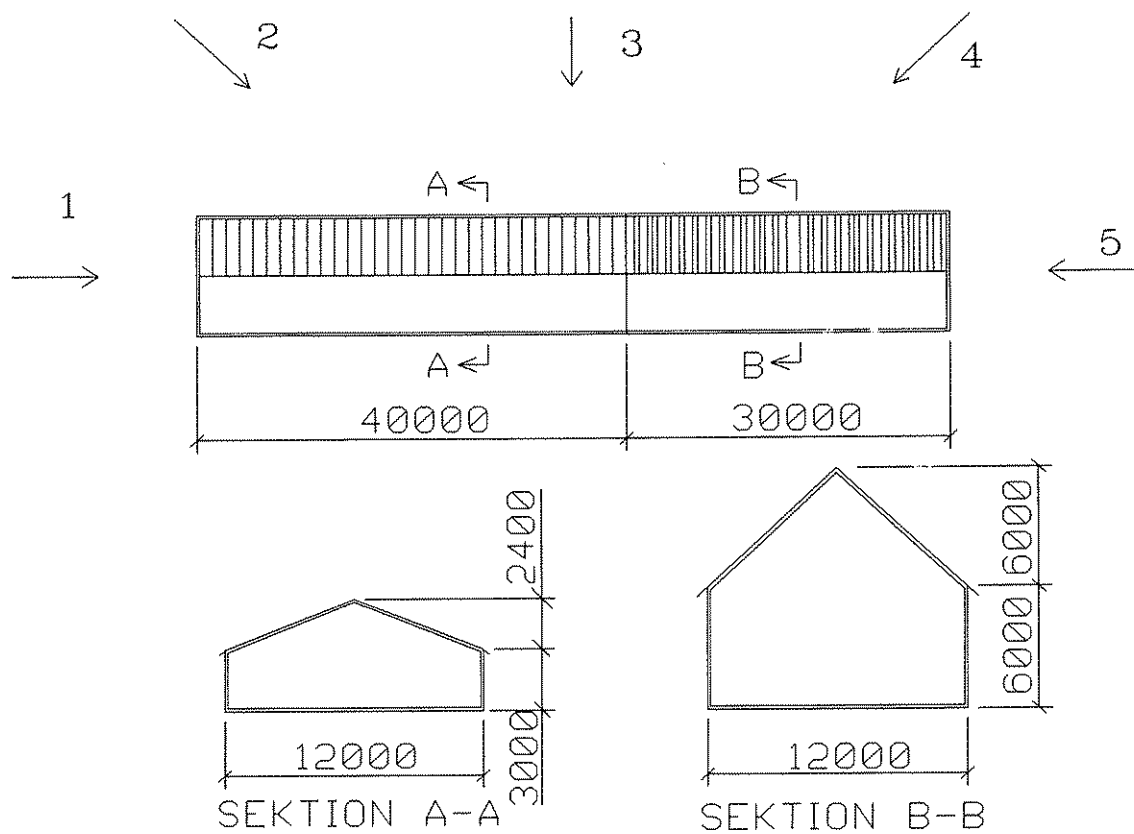
Förändringarna i strömningsmönstret kan förklaras av att det totala flödet genom modellen ändras p.g.a. strömningsmotståndet i spaltöppningen är lägre än i glespanelen. Detta medför att hastigheterna inne i modellen blir högre med spaltöppning i bakväggen. En koncentrerad stråle med hög hastighet påverkas lättare av hinder än en mer diffus ström med lägre hastighet. Identifiering av sådana hinder är alltså viktig vid modellstudier. Öppningens placering i höjddled synes också ha en stor inverkan, vilken bör undersökas närmare.

Inbördes placering av två byggnader med olika utformning

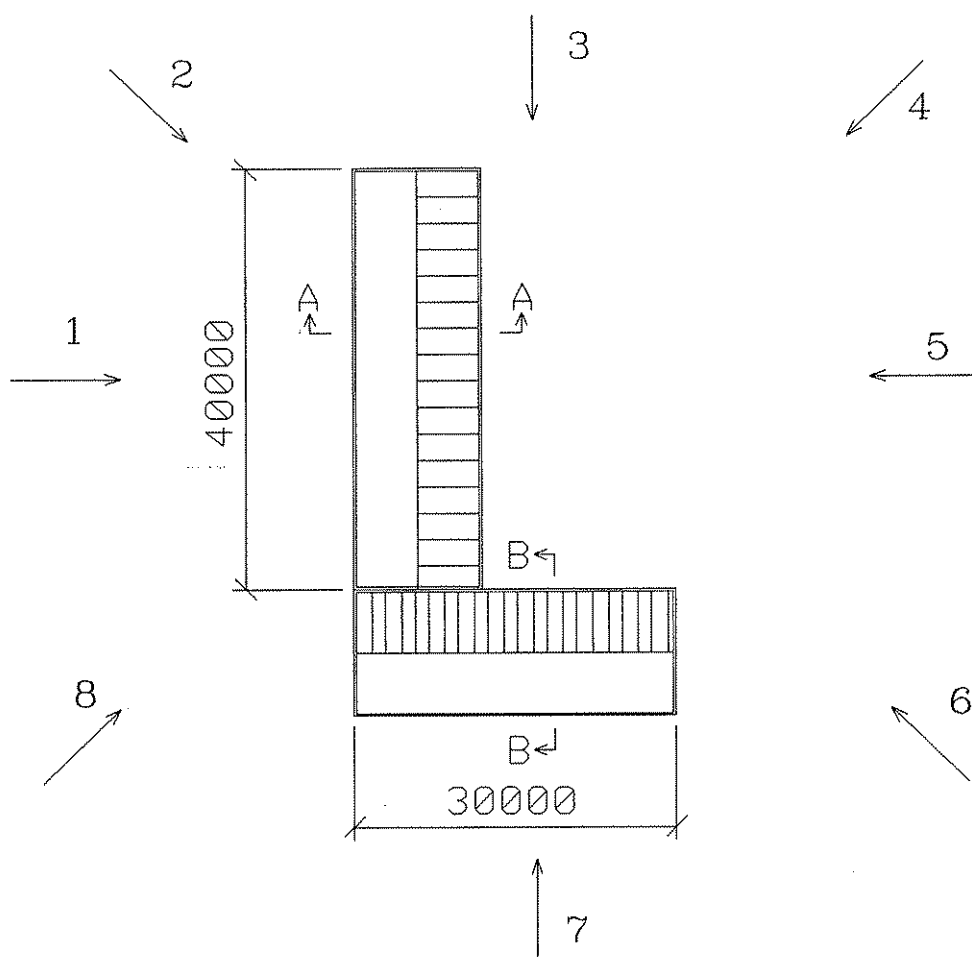
Utförande

De två byggnader som hade samma bredd men olika höjd och takvinkel placerades på två olika sätt i förhållande till varandra. Dels mednockarna parallella dels mednockarna vinkelrätt mot varandra. Dessa två utföranden testades för olika vindriktningar, se figur 20 och 21. Försöken dokumenterades med hjälp av videokamera. Modellerna byggdes i skala på 1:150, vilket medför att vindprofilen motsvarar den på en öppen slätt. Modellerna hade inga öppningar, utan hade gjorts helt täta genom att klistra på overheadfilm på de små glipor som fanns.

Avsikten med försöket var att finna placering(ar) av ett låghusstall med öppen nock i förhållande, dels till vindriktningen, dels till det högre huset, så att minsta möjliga problem skulle uppstå p.g.a. att snö blåste in genom den öppna nacken.



Figur 20. Plan och sektioner av dels djurstall med öppennock, A, och dels en högre byggnad, B. Nockarna ligger i linje med varandra. Siffrorna vid pilarna anger huvudsaklig vindriktning. Mått i mm.



Figur 21. Plan av djurstall med öppennock, A, och en högre byggnad, B. Nockarna ligger vinkelrätt mot varandra. Siffrorna vid pilarna anger huvudsaklig vindriktning. Mått i mm.

Resultat

De vindriktningar som gav nedåtriktade luft rörelser som i sin tur ger snönedslag från den höga byggnaden vidnocken på den låga byggnaden, närnockarna var parallella, kom snett eller vinkelrätt emot gaveln på den höga byggnaden, riktning 4 och 5 i figur 20. När byggnaderna låg vinkelrätt mot varandra blev det nedåtriktade rörelser motnocken hos den låga byggnaden vid alla vindriktningar som träffade den höga byggnaden först, 6, 7 och 8 i figur 21.

Längden på denna läzon med risk för snöinträngning längs mednocken uppmättes och återfinns i tabell 5.

Vindriktning **vinkelrätt** mot byggnaderna gav virvlar i sidled bakom den höga byggnaden som skulle kunna tänkas föra in snö genomnocken.

När husen har parallellanockar och vind och snö kommer snett eller vinkelrätt emot (1 och 2 i figur 20) den lägre byggnadens gavel kan deponeringen av snö från luft som ska passera den högre byggnaden samlas på den lägre byggnadens tak framför gaveln av den högre. Denna snö kan då falla ner genom den öppnanocken hos stallet. Denna situation gäller även för motsvarande vindriktningar (2, 3 och 4 i figur 21) när husen ligger i vinkel mot varandra.

Tabell 5. Försök att undvika snöinblåsning i ett stall med öppennock som är sammanbyggd med en högre byggnad. Uppmätta sträckor där luft och snö förväntas tränga ner genomnocken vid olika vindriktningar och därnockarna antingen är parallella eller vinkelräta mot varandra. Måtten har angivits för den verkliga byggnaden.

Vindriktning och byggnadernas inbördes placering	Nocklängd från den högre byggnaden med risk för snöinblåsning [m]
Vindriktning 4, parallellanockar	4,0
Vindriktning 5, parallellanockar	11,3
Vindriktning 6, vinkelrätanockar	9,0
Vindriktning 7, vinkelrätanockar	20,0
Vindriktning 8, vinkelrätanockar	6,8

Den husplacering och vindriktning som verkar ge minst problem med snö genomnocken är hus i vinkel och vind vinkelrätt mot det lägre, riktning 5 i figur 21. Då sker inget luftnedslag orsakat av den högre byggnaden och ingen snö ansamlas framför ett hinder eller att det blåser in snö från sidorna.

Diskussion

Inom lantbruksbyggandet finns det en tumregel som säger att den öppnanocken ska vara täckt 3 m från gavlarna. Med de förhållanden mellan modellernas höjd och takvinkel som fanns i detta försök verkar detta vara snålt tilltaget om den förhärskande vindriktningen vid ymnigt snöfall kommer vinkelrätt mot en hög byggnad och då en byggnad med en öppennock ligger i lä därbakom. Modellstudien visade att snö kan tränga in i ända upp till halva byggnadens längd eller 20 m i den här studien. Olämporna av detta kan avhjälpas genom täcka över en längre del avnocken. Den bästa placeringen är att

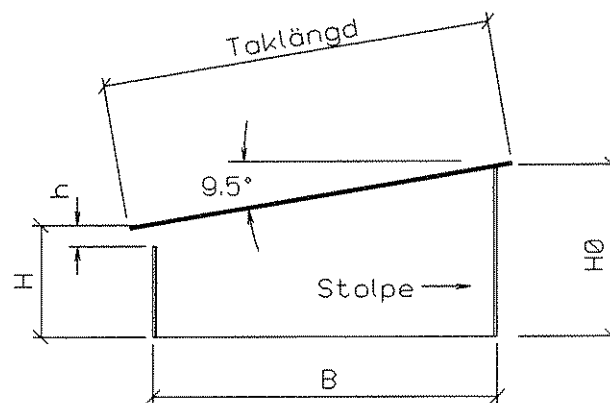
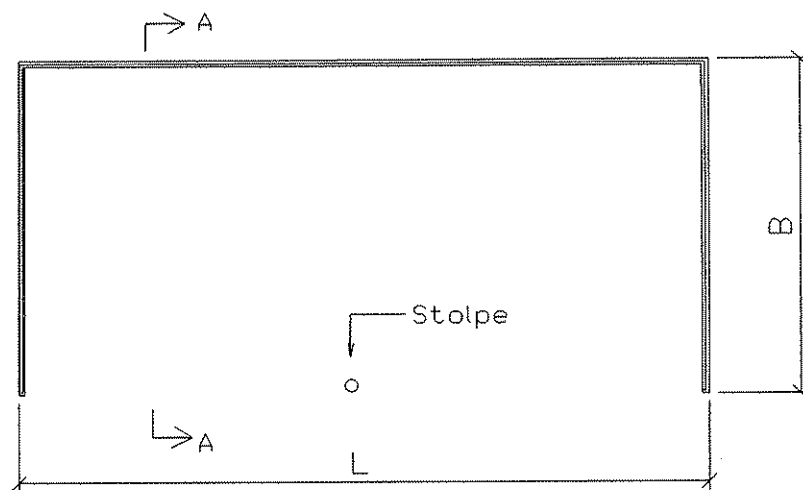
orientera stallet vinkelrätt mot den förhärskande vindriktningen, och att den högre byggnaden ligger vinkelrätt mot stallet och helst skjuter ut mot vindriktningen.

Reducering av snöproblem vid byggnader med öppen front

Utförande

En teori för att minska problemet med att snö driver in på framsidan i byggnader med öppen front när vinden ligger på bakifrån, är att ha en öppning i bakväggen. För att testa detta provades två olika utföranden av bakväggen på en i övrigt identisk modell av en byggnad med öppen front. Det ena utförandet som provades hade ingen öppning i bakväggen och det andra hade en längsgående horisontell spalt i bakväggen nära taket. Modellerna visas i figur 22 och måtten finns i tabell 6.

Vid Universitetet i Guelph i Kanada har man provat denna typ av byggnad (ingen öppning) genom att bygga en modell i skala 1:4 (mått enligt tabell 6) och placera den utomhus. Denna modell studerades under en snöstorm då vinden kom bakifrån. Samma situation simulerades senare i ett strömningsbord med en modell i skala 1:12 (mått enligt tabell 6). Det kanadensiska strömningsbordet är 20 % bredare och vattenhastigheten är 3 gånger så stor som i det svenska. För snösimulering placerades 4 kg sand i sandlådan över strömningsbordet. I de kanadensiska försöken var det 11,25 kg sand, (Darby, 1968). Mängden nedfallen snö under den verkliga stormen är inte angiven. Sanden i det egna försöket hade samma densitet och sandpartiklarnas diameter hade en liknande fördelning som i det kanadensiska. Sanddjupet mättes med en noggrannhet på 0,5 mm.



Sektion A-A

Figur 22. Plan och sektion av modellen med öppen front som användes i försöken för att undersöka snödeponering inne i och framför byggnaden. Mått enligt tabell 6.

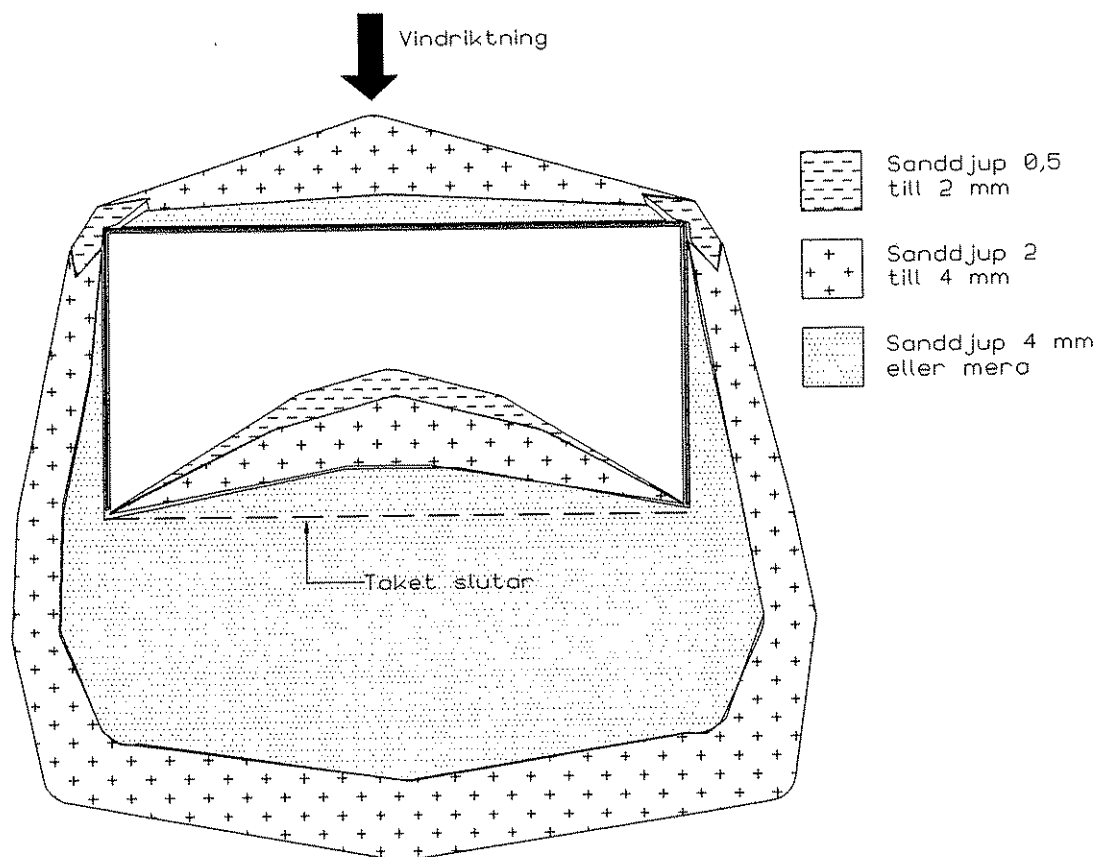
Tabell 6. Mått och dimensioner av byggnad med öppen front enligt kanadensisk förebild och motsvarande modell samt på svensk modell enligt figur 22. Mått i mm.

Dimension	Kanadensisk förebild	Kanadensisk modell i skala 1:12	Svensk modell i skala 1:18,75
Längd, L	3600	300	192
Bredd, B	1800	150	96
Bakre väggens höjd, H	600	50	32
Öppningens höjd, h	0	0	0 eller 6
Framsidas höjd, H0	900	75	48
Taklutning	1/6	1/6	1/6
Taklängd	2025	169	108

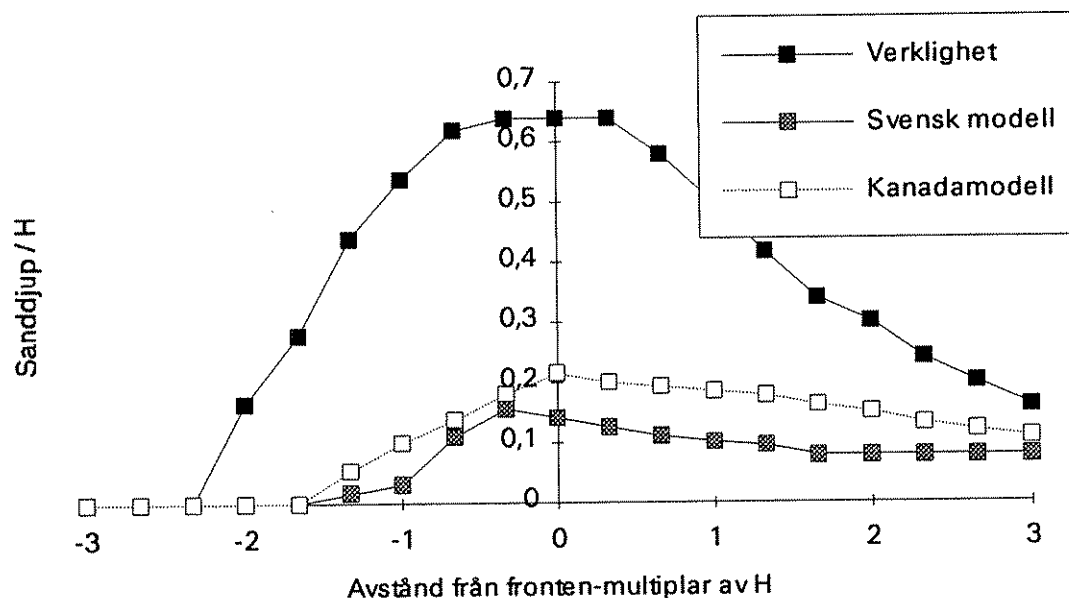
Resultat

För att kunna jämföra de olika försöken, har snödjupet framför och inuti byggnaden angivits i förhållande till den bakre väggens höjd, dvs i dessa fall den som vätter mot vinden. På motsvarande sätt har avstånden från fronten på byggnaden angivits, där minustecken innebär att punkten ligger inne i byggnaden. Den kvot mellan sanddjup och bakväggens höjd som redovisas i figurerna är baserad på det uppmätta snö respektive sanddjupet längs i en linje som går tvärs genom byggnadens mitt.

Den största inträngningen av snö/sand sker i mitten av byggnaden och avtar sedan i en bågform ut mot kortsidornas framkanter, se figur 23. Detta mönster för sanddeponering inne i byggnaden fanns i alla försöken. Sanddeponeringen utanför och framför byggnaden skilde sig däremot i de olika försöken. I det verkliga försöket var det mest snö mitt framför byggnaden och snödeponeringen avtog sedan längs med en bågform så att de två halvcirklarna bildade cirklar. I det svenska försöket i strömningsbordet var sanden relativt jämt fördelad framför byggnaden. Hur fördelningen av sand framför byggnaden var i det kanadensiska modellförsöket redovisas inte av Darby (1968). I figur 24 redovisas de kanadensiska försöken och det svenska, samtliga med tät bakvägg.

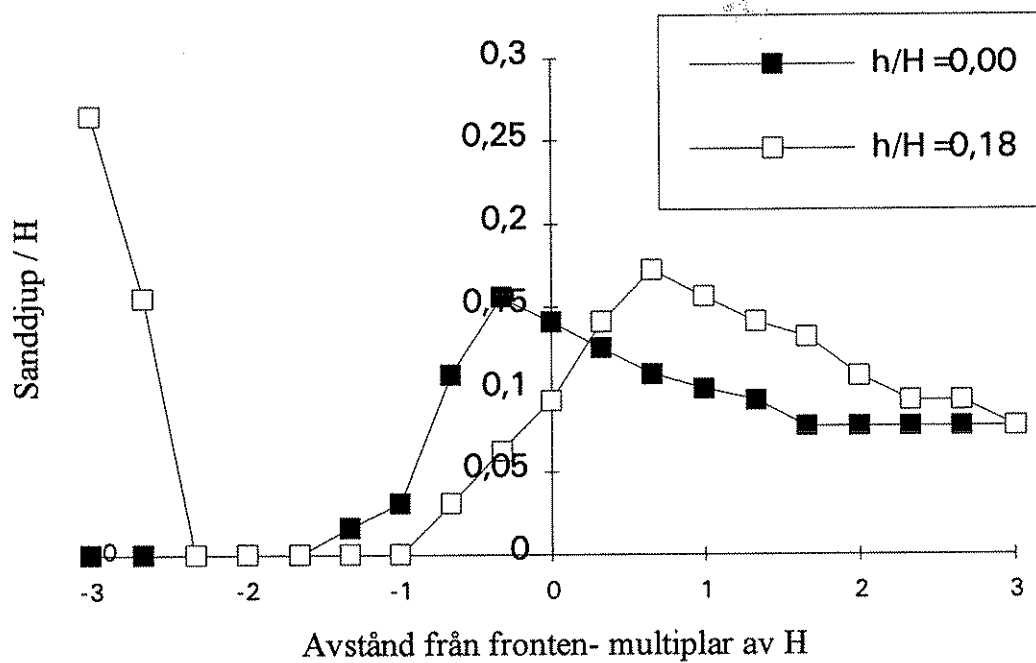


Figur 23. Deponering av sand runt modell med tät baksida i försök med strömningsbord i Sverige.

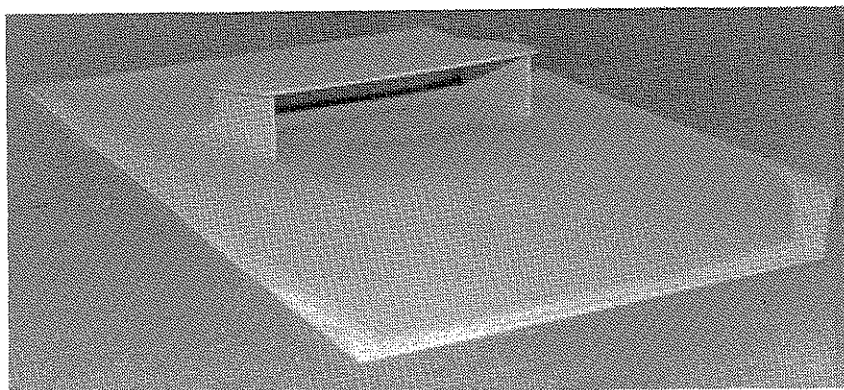


Figur 24. Sand/snödjup i förhållande till bakre väggens höjd, H, vid olika avstånd från byggnadens front, "minusavstånd" innebär att sand/snö ligger inuti byggnaden. Resultaten är från en verklig observation jämte modellförsök i Kanada, samt från modellförsök i Sverige.

Resultaten från det svenska försöket, som avsåg att jämföra snöinblåsning framifrån i en byggnad med öppen front med tät respektive med öppning försedd bakvägg, redovisas i figur 25. Med öppning i bakväggen kommer sand att tränga in och deponeras i en stor driva vid den bakre väggen, se figur 25. Den snöinträngning som sker framifrån genom den öppna fronten kommer inte så långt in och blir betydligt mindre när det finns en öppning i den bakre väggen. Framför byggnaden är skillnaderna i snödeponering små.



Figur 25. Sand/snödjup i förhållande till bakre väggens höjd, H , vid olika avstånd från byggnadens front, "minusavstånd" innebär att sand/snö ligger inuti byggnaden. Fyllda fyrkanter är värden där byggnaden har tät bakvägg. Öppna fyrkanter är värden där byggnaden har öppning i ovankant på bakväggen. Öppningen var 18 % av den totala bakväggens area.



Figur 26. Modell med öppen front där snödrift simulerats med sand. Modellen urtagen ur vattenbordet.

Diskussion

Den skillnad som finns mellan fördelningen inne i byggnaden mellan den verkliga fallet och modellerna beror nog på att snön i det verkliga fallet hade blåst av taket vilket det inte gjorde i modellförsöket, samt att det är oklart hur mycket snö som föll under snöstormen. En annan skillnad är att snö trängde längre in i huset i det verkliga fallet jämfört med modellen. Detta kan bero på att snökristaller med en lägre fallhastighet, v_t , fanns i snöstormen men att motsvarande partiklar inte fanns i den sand som användes i modellförsöken. Mönstret med högre sand i mitten av modellens framsida överensstämde med verkligheten.

Framför byggnadens är resultaten kvalitativt korrekta i en mittzon, men denna zon begränsas av det område där snödrev skulle inträffat i en verklig snöstorm, dvs de områden som sträcker sig från kortsidorna snett in mot mitten. Snöfall utan snödrift längs marken kan dock återges på ett kvalitativt sätt med modellstudier i strömningsbordet.

Den **slutsats** man kan dra av jämförelsen mellan det verkliga utfallet av snödeponering och det simulerade i strömningsbord är att snöfall kvalitativt kan efterliknas, men kvantitativt är resultaten inte korrekta. Detta är samma slutsats som Naraine (1966) kom fram till. Theakston (1973) däremot anser att jämförande av modellstudier ger säkerhet och nästan perfekta förutsägelser av verkligheten

Skillnaderna i deponering av snö i modellen med tät respektive med öppning försedd baksida, visar att hypotesen att en öppning i baksidan minskar problemet med snö inne i modellen är riktig. En öppning i den vägg som vätter mot vinden ger att snö/sand blåser in genom öppningen och kan orsaka problem. Denna inblåsning kan förhindras genom att sätta en huv med öppningen ner mot marken framför öppningen. Huvens storlek får avvägas mellan att vara liten nog för att hindra direkt snöinblåsning och stor nog för att hindra snödeponeringen via den öppna fronten.

LITTERATUR

- Bagnold, R. A. 1973. The nature of saltation and of bed-load transport in water. Proc. Royal Society. Series A, Vol. 332, s. 473-504. London. England.
- Darby, D. E. 1968. Snow control for open-front sheds. M. Sc. Thesis. Faculty of graduate studies. University of Guelph. Canada.
- Jensen, M. 1958. The model-law for phenomena in natural wind. Ingenioren. No 4. s. 121-128. Köpenhamn. Danmark.
- Keitz, E. L. Strom, G. H. Kelly, G. R. Weiss, R. F. 1962. Scale model studies on snow drifting. U.S. army snow ice and permafrost research establishment. Research report 73.
- Kind, R. J. 1981. Snow drifting. Handbook of snow. s. 338-359. Pergamon press. Canada.
- Krieg. 1992. Vindatlas för Sverige. SMHI. Norrköping. Sverige
- Lyles, L. Allison, B.E. 1979. Wind profile parameters and turbulence intensity over several roughness element geometries. Transactions of the ASAE 1(6) vol. 24. St. Joseph. USA.
- Magano, C. Lee, C. 1966. Meteorological classification of natural snow crystals. Journal Faculty of science. Hokkaido University. Series VII. vol. 2. s 321-335. Hokkaido. Japan.
- Naraine, D. 1966. Measurement analysis of snow and wind disposition by the use of models. M. Sc. Thesis. Faculty of graduate studies. University of Guelph. Canada.
- Smith, E. G. 1951. The feasibility of using models for predetermining natural ventilation. Research report 26. Texas engineering experiment station. Texas. USA.
- Timmmons, M. B. 1980. Use of models to predict fluid motion in mechanically ventilated structures. ASAE paper no. 80-4018. St. Joseph. USA.
- Theakston, F. H. 1973. Snow control for agricultural buildings. A paper presented to the C. I. G. R. seminar section II. Helsinki, Finland.

APPENDIX

Tabell 7. Uppmätta hastigheter på olika platser i strömningsbordet vid 6 cm:s vattendjup, i ett försök utan vindprofilgeneratorer.

Längd från skarv	Tvärsnitt smått Y [cm]	2	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	98
30	Hastighet	0,24	0,25	0,24	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
60	[m/s]	0,22	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23	0,24	0,25	0,24	0,24	0,24	0,22
90		0,19	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,21
120		0,19	0,22	0,23	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,22	0,21	0,18

Tabell 8. Uppmätta hastigheter vid ett vattendjup av 15 cm, ostört flöde.

Längd från skarv [cm]	Måtdjup propelleraxel från botten [cm]	Y=25 cm	Y=50 cm	Y=75 cm
X=30	1,2	0,08	0,09	0,08
	2,5	0,09	0,09	0,08
	5,0	0,09	0,09	0,08
	7,5	0,09	0,09	0,09
	10,0	0,09	0,08	0,08
	12,5	0,09	0,09	0,08
Y=60	1,2	0,08	0,08	0,07
	2,5	0,09	0,09	0,08
	5,0	0,09	0,08	0,09
	7,5	0,09	0,09	0,08
	10,0	0,09	0,09	0,08
	12,5	0,09	0,09	0,08
Y=90	1,2	0,08	0,08	0,07
	2,5	0,09	0,09	0,08
	5,0	0,09	0,08	0,09
	7,5	0,09	0,09	0,08
	10,0	0,09	0,09	0,08
	12,5	0,09	0,09	0,08

Tabell 9a. Uppmätta hastigheter med vindprofilgeneratoren i strömningsbordet.

Längd från skarv	Tvärsnitts mått Y [cm]	2	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	98
30	Hastighet	0,1 0	0,12	0,1 3	0,20	0,24	0,2 2	0,24	0,26	0,2 7	0,25	0,28	0,28
60	[m/s]	0,1 3	0,14	0,1 5	0,23	0,23	0,2 3	0,26	0,26	0,2 5	0,26	0,27	0,27
90		0,1 2	0,14	0,1 6	0,22	0,23	0,2 3	0,24	0,26	0,2 5	0,27	0,28	0,26
120		0,1 1	0,13	0,1 5	0,20	0,21	0,2 3	0,23	0,24	0,2 4	0,25	0,26	0,25

Tabell 9b. Uppmätta hastigheter med vindprofilgeneratoren i strömningsbordet.

Längd från skarv	Tvärsnitts mått Y [cm]	2	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	98
30	Hastighet	0,29	0,29	0,26	0,27	0,25	0,25	0,25	0,21	0,23	0,18	0,11	0,11
60	[m/s]	0,27	0,29	0,27	0,25	0,24	0,25	0,24	0,23	0,22	0,18	0,12	0,10
90		0,24	0,29	0,25	0,24	0,25	0,25	0,23	0,22	0,21	0,17	0,12	0,11
120		0,25	0,28	0,26	0,25	0,23	0,23	0,23	0,22	0,21	0,16	0,12	0,09

Tabell 10. Uppmätta hastigheter med den 3-dimensionella vindprofilgeneratoren,
vattendjup 15 cm.

Längd från skarv [cm]	Måtdjup propelleraxel från botten [cm]	Y=25 cm	Y=50 cm	Y=75 cm
X=30	1,2	0,06	0,06	0,06
	2,5	0,07	0,07	0,07
	5,0	0,08	0,08	0,08
	7,5	0,10	0,09	0,08
	10,0	0,10	0,10	0,09
	12,5	0,10	0,10	0,09
Y=60	1,2	0,06	0,06	0,06
	2,5	0,07	0,08	0,07
	5,0	0,08	0,08	0,08
	7,5	0,09	0,09	0,08
	10,0	0,10	0,09	0,09
	12,5	0,10	0,10	0,09
Y=90	1,2	0,06	0,06	0,06
	2,5	0,07	0,07	0,07
	5,0	0,08	0,08	0,08
	7,5	0,09	0,09	0,08
	10,0	0,09	0,09	0,09
	12,5	0,09	0,09	0,09